

Schlussbericht

zu IGF-Vorhaben Nr. [18291 N]

Thema

Urban Logistics Facilities - Kooperativ genutzte Logistikeinrichtungen als Zukunftskonzepte für die Versorgung urbaner Zentren

Berichtszeitraum

01.01.2017 bis 30.11.2019

Forschungsvereinigung

Bundesvereinigung Logistik (BVL) e.V., Schlachte 31, 28195 Bremen

Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Darmstadt
Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik
Hochschulstraße 1
64289 Darmstadt

Darmstadt, 05.03.2020

Ort, Datum

Prof. Dr. Ralf Elbert

Name und Unterschrift aller Projektleiterinnen und Projektleiter der
Forschungseinrichtung(en)

Technische Universität Darmstadt
Fachbereich 1
Fachgebiet Unternehmensführung & Logistik
Prof. Dr. Ralf Elbert
Hochschulstraße 1
64289 Darmstadt

Gefördert durch:

Zusammenfassung

Im Forschungsprojekt „Urban Logistics Facilities - Kooperativ genutzte Logistikeinrichtungen als Zukunftskonzepte für die Versorgung urbaner Zentren“ wurden Logistikkoperationen kleiner und mittelständischer Logistikdienstleister (KM-LDL) im urbanen Raum untersucht. In den letzten Jahren haben die Herausforderungen für die Durchführung von Logistikdienstleistungen in Städten vor dem Hintergrund des durch Urbanisierung und Digitalisierung veränderten Nachfrageverhaltens, der Verlagerung der Logistikeinrichtungen an die Stadtränder und der strengeren gesetzlichen Auflagen, wie beispielsweise Lieferzeitbeschränkungen und Umweltzonen, stetig zugenommen. Besonders für die KM-LDL, welche eine verhältnismäßig geringe Finanzkraft besitzen, aber regional stark verbunden sind, wird diese Entwicklung zu einer Bedrohung, da sie aus ihrem regionalen Umfeld verdrängt werden. Ein Lösungsansatz besteht im Aufbau von Kooperationen, um die Chancen im urbanen Raum nutzen zu können. Allerdings gibt es bisher kaum systematische Konzepte urbaner Logistikkoperationen insbesondere für KM-LDL. Viele der bisher umgesetzten kooperativen Konzepte für die städtische Logistik wurden auf Grund mangelnder Wirtschaftlichkeit eingestellt. Folglich müssen die Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von urbanen Logistikkoperationen identifiziert werden. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor für Logistikkoperationen liegt hierbei in der Gestaltung eines Preismodells mit einer geeigneten Vergütungsart und Risikoteilung. Während die Vorteile einer Kooperation über Effizienzgewinne nachvollziehbar aufgezeigt werden können, scheitern viele Kooperationen auf Grund der opportunistischen Ausnutzung von Informationsasymmetrien der Beteiligten. Das Preismodell muss also Mechanismen beinhalten, die durch eine gezielte Anreizwirkung zu einer Zielharmonisierung der Kooperationspartner führen. Die Aufgabe im Rahmen des Projektes bestand folglich darin, ein Preismodell für den kooperativen Betrieb von urbanen logistischen Einrichtungen mit zugehöriger Distribution („Urban Logistics Facilities“) durch KM-LDL zu identifizieren.

Die Entwicklung des Preismodells wurde methodisch mit Hilfe einer simulationsbasierten Untersuchung der Auswirkungen von Logistikkoperationen auf die einzelnen Partner umgesetzt werden. Hierzu wurde als erster Schritt eine umfassende Literaturrecherche in wissenschaftlichen und praxisnahen Fachzeitschriften durchgeführt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Literaturanalyse wurden anschließend ein agentenbasiertes Simulationsmodell zur Darstellung der Prozesse in einem Multi-User Warehouse/einem Urban Consolidation Center entwickelt. Detailliert und praxisorientiert konnten die entsprechenden Besonderheiten der Planungs- und Ausführungsaufgaben von Kooperationen in der Urbanen Logistik, sowie die

charakteristischen Verhaltensweisen der Akteure durch Workshops, Interviews und in Fallstudien aufgenommen werden.

Die Ergebnisse der Simulationsstudie belegen, dass vor allem Auftragsspitzen der Partner die Bearbeitungszeiten beeinflussen. Spitzen in der Auftragserteilung des einen Partners führen dazu, dass gemeinsam genutzte Kommissionierer überproportional viel Zeit für die Bearbeitung der Aufträge benötigen, was sich direkt auch auf die Durchlaufzeiten der Aufträge der anderen Partner im Lager auswirkt. Die Ergebnisse untermauern damit den Bedarf an einem Preismodell, welches ein kooperatives Verhalten der Partner in einem kooperativen Lager fördert. Gleichzeitig konnten auf Basis der Simulation Anforderungen für ein solches Preismodell systematisch abgeleitet werden. So konnte anschließend ein Preismodell entwickelt werden, welches in der Lage ist, basierend auf der gegenwärtigen Auslastung der vorhandenen Kommissionierer in Echtzeit einen Preis für jeden einzelnen Pick im Lager festzulegen, sodass die Gesamtkosten des Lagers gedeckt werden. Das Preismodell wurde abschließend im Simulationsmodell implementiert und mit Hilfe der Simulation verifiziert und validiert.

Zusätzlich dazu wurde im Rahmen des Projektes ein weiteres agentenbasiertes Simulationsmodell zur Abbildung und Untersuchung eines innerstädtischen Distributionsnetzwerkes entwickelt. Auf diese Weise wurde der ursprüngliche Horizont des Projektes sinnvoll um die Betrachtung der urbanen Distribution erweitert, welche insbesondere auch von den im Projektausschuss beteiligten Partnern als entscheidende Komponente kooperativer Konzepte für die urbane Logistik angesehen wurde.

Die Projektergebnisse in diesem Bereich liefern wichtige Erkenntnisse zur Gestaltung kooperativer urbaner Distributionsnetzwerke: Zum einen stellt eine Kooperation in einem UCC zwar eine größere finanzielle Belastung für Transportunternehmen dar. Allerdings gibt es auch klare Hinweise, dass insbesondere ordnungspolitischen Maßnahmen durch Kooperationen auf diesem Feld effizient begegnet werden kann. So wurde beispielsweise auch die Möglichkeit untersucht, innerstädtischen Zufahrtsbeschränkungen für Lieferfahrzeuge mit einem Weitertransport der Waren aus kooperativen Mikro-Depots durch Lastenräder zu begegnen.

Durch die gewählte Forschungsmethodik konnten folglich neue Erkenntnisse zur akteursübergreifenden Nutzung von gemeinsamen Kommissionierkapazitäten und Distributionskanälen gewonnen werden. So konnte eine Thematik, die aufgrund des hohen Kostendrucks auf dem Logistikmarkt und der sich abzeichnenden Notwendigkeit für innovative Lösungen im urbanen Logistikbereich eine hohe Relevanz besitzt aus einer bisher kaum erforschten Perspektive untersucht werden. Die Ergebnisse der Simulationsstudie und der Abschlussbericht zur Dokumentation zentraler Projektergebnisse stehen zur Verfügung, um Erkenntnisse und

Handlungsempfehlungen aus dem Projekt direkt zur Verbesserung von Kooperationen nutzbar zu machen.

Ausführlicher Sachbericht des Forschungsvorhabens

Inhaltsverzeichnis

THEMA	1
BERICHTSZEITRAUM	1
FORSCHUNGSVEREINIGUNG	1
FORSCHUNGSEINRICHTUNG(EN)	1
ZUSAMMENFASSUNG	2
1. VORBEMERKUNG	6
2. DURCHFÜHRUNG UND ERGEBNISSE DER EINZELNEN ARBEITSPAKETE	6
2.1 ARBEITSPAKET 1 – KOOPERATIVE GESTALTUNGSMÖGLICHKEITEN VON ULF	8
2.2 ARBEITSPAKET 2 – SIMULATION DES VERHALTENS EXEMPLARISCHER ULF	11
2.2.1 Simulation der Prozesse in kooperativen Lagern	13
2.2.2 Simulation der urbanen Distribution	17
2.3 ARBEITSPAKET 3 – UNTERSUCHUNG VERHALTENSBEZOGENER ASPEKTE	21
2.3.1 Verhaltensbezogene Aspekte in kooperativen Lagern	22
2.3.2 Verhaltensbezogene Aspekte in der urbanen Distribution.....	30
2.4 ARBEITSPAKET 4 – IDENTIFIKATION EINES PREISMODELLS	37
2.4.1 Preismodell für die kooperative Kommissionierung im Lager.....	39
2.4.2 Preismodell für die kooperative urbane Distribution	50
2.5 ARBEITSPAKET 5 – LEITFADEN UND PROJEKTABSCHLUSS	53
3. VERWENDUNG DER ZUWENDUNGEN	55
5. BEWERTUNG DES WISSENSCHAFTLICH-TECHNISCHEN UND WIRTSCHAFTLICHEN NUTZENS DER ERZIELTEN ERGEBNISSE INSBESONDERE FÜR KMU SOWIE IHRES INNOVATIVEN BEITRAGS UND IHRER INDUSTRIELLEN ANWENDUNGSMÖGLICHKEITEN	58
6. ERGEBNISTRANSFER IN DIE WIRTSCHAFT	61
6.1 TRANSFERMAßNAHMEN WÄHREND DER PROJEKTLAUFZEIT	61
6.2 TRANSFERMAßNAHMEN NACH ABSCHLUSS DES VORHABENS	66
7. ZUSAMMENFASSUNG UND ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG	67
LITERATURVERZEICHNIS	68

1. Vorbemerkung

Das Vorhaben „Urban Logistics Facilities - Kooperativ genutzte Logistikeinrichtungen als Zukunftskonzepte für die Versorgung urbaner Zentren (Kurztitel: „Urban Logistics Facilities“) wurde im Förderzeitraum von Januar 2017 bis November 2019 unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Elbert am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Für die Projektarbeit waren die beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter Jan-Karl Knigge und Anne Friedrich zuständig. Insgesamt acht studentische Hilfskräfte unterstützten die Projektbearbeitung. Im Zusammenhang mit dem Projekt entstanden außerdem zehn wissenschaftliche Arbeiten. Dabei handelte es sich um drei Bachelor-, fünf Master- und zwei Studienarbeiten. Eine Dissertation auf dem Gebiet der urbanen Logistik ist derzeit am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik in Arbeit. Im Rahmen des Projektes wurden mit den Unternehmen des projektbegleitenden Ausschusses sowie mit weiteren Experten aus der Praxis Interviews, Workshops und Vor-Ort-Besuche zur Datenaufnahme, Validierung und Sicherstellung einer praxistauglichen und transferierbaren Zielverfolgung durchgeführt.

Das IGF-Vorhaben 18291 N der Forschungsvereinigung Logistik wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Die Erforschung der im Projektantrag gestellten und zu Beginn der Laufzeit konkretisierten Aufgabenstellung erfolgte entsprechend dem Projektplan in fünf Arbeitspaketen. Die Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete und der erzielten Ergebnisse erfolgt in Kapitel 2 dieses Berichts. Anschließend wird die Verwendung der Zuwendungen in Kapitel 3 begründet erläutert. In Kapitel 4 wird die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit thematisiert bevor in Kapitel 5 eine Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen vorgenommen wird. Der Bericht schließt mit der Beschreibung der Maßnahmen zum Transfer in die Wirtschaft in Kapitel 6 und einer abschließenden Bewertung sowie Zusammenfassung in Kapitel 7.

2. Durchführung und Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete erläutert und den durch den Projektplan vorgegebenen Zielen gegenübergestellt. Insgesamt ist die Projektbearbeitung

in fünf Arbeitspakete gegliedert. Bereits relativ früh während der Bearbeitung des Forschungsprojektes wurde erkannt, dass der Simulationsmodellierung eine größere Bedeutung zugeordnet werden muss. Insbesondere die Ableitung und Überprüfung möglicher Preismodelle für kooperative Logistikeinrichtungen sowie die Untersuchung verhaltensbezogener Aspekte kann durch eine entsprechende Simulation entscheidend unterstützt werden. Aus diesem Grund wurden die Arbeitspakete 2 und 4 gegenüber dem beantragten Projektplan in Absprache mit den Projektpartnern getauscht, sodass nun die Simulationserstellung bereits in Arbeitspaket 2 begonnen und parallel zur Bearbeitung der folgenden Arbeitspakete fortgesetzt und erweitert werden kann. Arbeitspaket 2 wurde von der Dauer zusätzlich entsprechend verlängert.

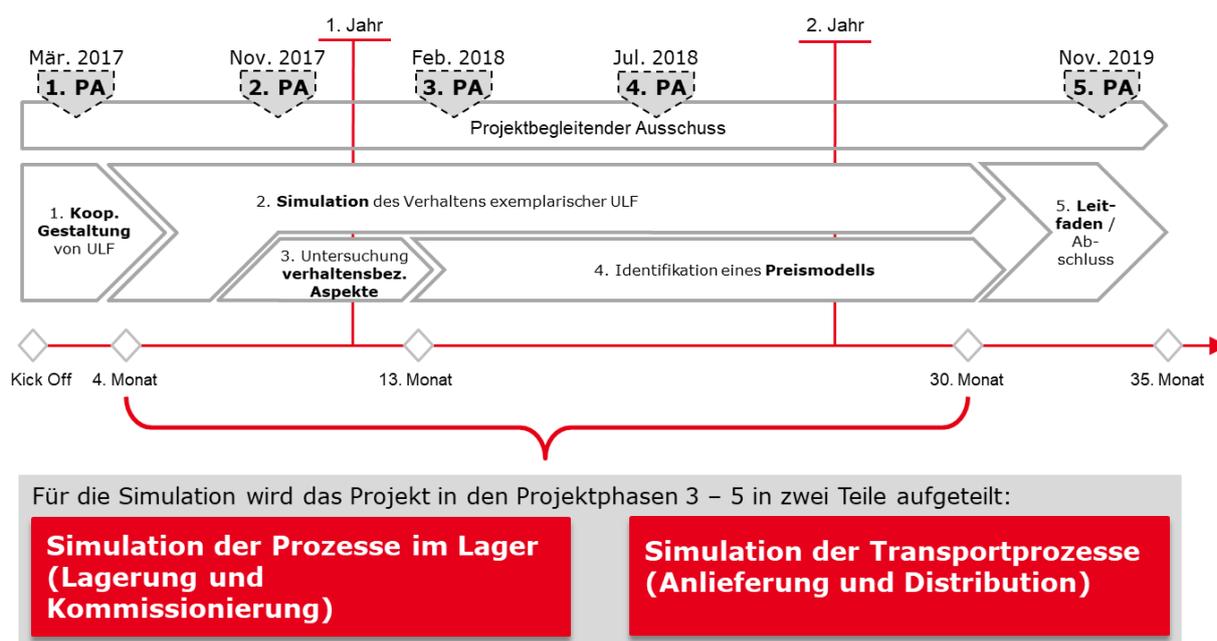
Das Forschungsvorhaben wurde zudem gegenüber dem ursprünglichen Projektplan kostenneutral um insgesamt elf Monate verlängert. Grund hierfür war zum einen die verzögerte Nachbesetzung offener Stellen am Fachgebiet Unternehmensführung und Logistik, weswegen die für das Projekt eingeplanten Mitarbeiter anderweitig eingesetzt werden mussten. Zum anderen wurde die Projektlaufzeit um die viermonatige Elternzeit des Mitarbeiters Jan-Karl Knigge verlängert. Auf Grund dieser Verlängerung wurden Arbeitspaket 2 und Arbeitspaket 4 von der Bearbeitungsdauer gegenüber dem ursprünglichen Projektplan gestreckt.

Die einzelnen Arbeitspakete gliedern sich wie folgt: Das erste Arbeitspaket dient der Festlegung und Abgrenzung des Forschungsvorhabens, indem kooperative Gestaltungsmöglichkeiten urbaner Logistikeinrichtungen identifiziert werden. Das zweite Arbeitspaket umfasst die Modellierung der agentenbasierten Simulation. Parallel dazu wurden in Arbeitspaket 3 mögliche Verhaltensweisen von Akteuren identifiziert und in der Simulation implementiert. Die Ergebnisse aus dieser Simulation wurden anschließend dazu genutzt, um im vierten Arbeitspaket ein Preismodell zu entwickeln, das ein kooperatives Verhalten begünstigt. Auch dieses Preismodell wurde im Simulationsmodell abgebildet. Das letzte Arbeitspaket diente dem Projektabschluss und der Verschriftlichung der Projektergebnisse.

Im Rahmen des Projektbegleitenden Ausschusses wurden zwei zentrale Bereiche für die Simulation verhaltensbezogener Aspekte der Akteure im Zusammenhang mit der urbanen Logistik identifiziert: Zum einen sollen die Verhaltensweisen innerhalb des zugehörigen Lagers untersucht werden. Zum anderen spielt auch die Auslieferung zwischen UCC und Zielen im urbanen Raum eine Rolle. Anstatt sich auf die Untersuchung einer dieser beiden Bereiche zu beschränken, wurde gemeinsam mit den Projektpartnern entschieden, die Arbeitspakete 2, 3 und 4 jeweils gemäß der beiden möglichen Betrachtungsweisen zu teilen und auf diese Weise zwei unterschiedliche Simulationsmodelle zu entwickeln. So konnte der Betrachtungshorizont

des Projektes gegenüber der ursprünglich beantragten Ausrichtung sinnvoll erweitert und ergänzt werden.

Das Vorgehen zur Generierung der Ergebnisse mit den jeweiligen Arbeitspaketen ist in Abbildung 1 graphisch dargestellt. Der Abbildung können darüber hinaus die Termine der Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses entnommen werden. Diese wurden entweder zum Abschluss bzw. vor Beginn eines Arbeitspaketes oder – im Falle des vierten Termins – ungefähr in der Mitte von AP 4 veranstaltet, um wichtigen Input für die Entwicklung des Preismodells zu liefern.



◇ Meilensteine als Abschluss der jeweiligen Arbeitspakete

Abbildung 1: Übersicht über die Arbeitspakete und Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses während der Projektlaufzeit

2.1 Arbeitspaket 1 – Kooperative Gestaltungsmöglichkeiten von ULF

Zielsetzung und Ausgangslage: Im Kontext des ersten Arbeitspaketes wurde zunächst der Rahmen für die folgende Forschung festgelegt und das Forschungsprojekt mit Hilfe von Literaturrecherchen und parallel durchgeführten Fokusgruppeninterviews im Rahmen der Projektworkshops abgegrenzt.

Vorgehen: Für das Arbeitspaket 1 wurde eine umfassende Recherche in der wissenschaftlichen Literatur sowie in der deutschsprachigen Praxisliteratur durchgeführt. Für

die Recherche nach praxisrelevanter Literatur wurde die Datenbank WISO genutzt, während für die wissenschaftliche Literatur die Datenbanken Science Direct, Emerald Insight, EbscoHost, Web of Science, Scopus und Google Scholar herangezogen wurden.

Zur Vorbereitung der folgenden Arbeitspakete wurde speziell das Leistungsangebot von Urban Consolidation Centers (UCC) im Detail analysiert. Gleichzeitig wurden Barrieren und Treiber von UCCs theoriegeleitet identifiziert und entsprechend aufbereitet. Hierbei wurde bereits ein Fokus auf die kooperative Zusammenarbeit mehrerer Partner in einem solchen UCC gelegt. Durch die systematische Literaturrecherche im Rahmen des Forschungsprojektes konnten so die relevanten Einflussfaktoren, die sich auf den wirtschaftlichen Betrieb von UCCs auswirken, als zentrales Ergebnis dieses Arbeitspaketes identifiziert werden. Diese können in die folgenden vier Gruppen eingeteilt werden:

- Äußere Einflüsse (z.B. Standort, verfügbare Ressourcen und Infrastruktur, Nachfrage und Bedarf)
- Einfluss der Stakeholder (z.B. politische und administrative Unterstützung und Rahmenbedingungen lokaler Behörden, Teilnehmer und Wettbewerber)
- Organisatorische Aspekte (z.B. operative Organisation und Zweck, Auslastungsgrad des Lagers und der Fahrzeuge, angebotene Zusatzleistungen)
- Finanzielle Aspekte (z.B. ökonomische Realisierbarkeit, Subventionen)

Eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Faktoren zu den genannten Gruppen ist dabei nicht immer einwandfrei möglich. Teilweise überschneiden sich Einflussfaktoren inhaltlich oder beeinflussen direkt einen weiteren der identifizierten Faktoren. Auch die Trennung nach Treibern und Barrieren kann nicht zu 100 % trennscharf erfolgen, da einige Treiber im Falle eines Fehlens automatisch zu Barrieren erfolgreicher UCCs werden. Insbesondere auf die letzten beiden Punkte, also organisatorische und finanzielle Aspekte, wurde im Rahmen des Forschungsauftrages des vorliegenden Forschungsprojektes ein besonderes Augenmerk gerichtet.

Zunächst konnte festgestellt werden, dass die Themenbereiche Urban Consolidation Center und Multi-User-Warehouses (MUW) mit ihren Herausforderungen und Potenzialen während der vergangenen Jahre in Theorie und Praxis zunehmend diskutiert wurden. Das Urban Consolidation Center stellt eine stadtnahe logistische Einrichtung zur Entkopplung des außerstädtischen und innerstädtischen Warenverkehrs dar (Browne et al. 2012, Marcucci/Danielis 2008). Durch die Konsolidierung des außerstädtischen Verkehrs für die innerstädtische Versorgung soll eine nachhaltige Lösung zur Belieferung des Innenstadtbereichs erfolgen, indem die Verkehre reduziert und die konventionellen Verkehrsträger durch neuartige ersetzt werden (Crainic et al. 2009). Urbane

Logistikeinrichtungen können auch als Anbieter von Value-Added-Services dienen (Moutaoukil et al. 2012). Dabei können diverse Dienstleistungen, wie das Retouren-Management, Verpackung und Qualitätskontrolle, angeboten werden (Browne et al. 2007, van Duin et al. 2010). Logistikzentren in unmittelbarer Nähe der Innenstadt bieten z.B. Lagerplatz für Einzelhändler, die durch Raumrestriktionen in der Lagerfläche limitiert sind. In diesem Fall kann die bedarfsgerechte Einteilung der Lagerkapazitäten nach dem MUW-Konzept den Nutzern den Vorteil von geringen Fixkosten ermöglichen. Das Konzept des MUW wird als Lösung des Spannungsfeldes der flexiblen Kapazitätsbedarfe, der Kostenreduzierung und der Knappheit der Logistikflächen angeführt (Danielis et al. 2010). MUW reichen von „Warehouse within a Warehouse“-Konzepten bis hin zur vollständig kooperativen Nutzung der Einrichtung und aller Services. Bei „Warehouse within a Warehouse“-Konzepten werden lediglich die Kosten für das Gebäude geteilt. Dieses Konzept findet meist bei traditionellen Konkurrenten Anwendung (Franklin/Spinler 2011). Bei konsequent realisierten MUW können höhere Skaleneffekte durch gemeinsame Ressourcennutzung erzielt, die Kapazitätsauslastung durch verschiedenartige Kunden erhöht und durch Konsolidierung die Lieferfrequenz gesteigert werden. Für klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) ist die Nutzung von MUW von hoher Relevanz, da diese von den Skaleneffekten profitieren, die sie auf Grund ihrer geringen Größe sonst nicht erzielen könnten (Pan et al. 2013, Makaci et al. 2017).

Nach dem Scheitern vieler Kooperationsprojekte, die dem Themenbereich der „City Logistics“ zugerechnet werden, erlebt die urbanen Logistik seit rund zehn Jahren eine Renaissance (Browne et al. 2007, Marcucci/Danielis 2008). Aktuelle Veröffentlichungen beschäftigen sich mit den Gründen des Scheiterns der vergangenen Projekte und thematisieren erste mögliche Erfolgsfaktoren (van Duin et al. 2010). Die Umsetzung scheiterte u. a. auf Grund der mangelnden Generierung einer kritischen Gütermenge, welche eine wirtschaftlich tragbare Lösung nicht ermöglichte, sowie oftmals die geringe Kooperationsbereitschaft der relevanten Akteure (Lindholm 2012). Yang et al. (2014) arbeiteten heraus, dass auch ein passendes Design der Verträge einen kritischen Faktor für das Gelingen von Kooperationen darstellt. Für den Erfolg einer kooperativen urbanen Versorgung ist es wichtig, dass die Konkurrenzsituation durch die Zusage zu einem gemeinsamen Vorhaben reduziert wird (Marcucci/Danielis 2008). Gemeinschaftliche Projekte verschiedener Akteure in der urbanen Logistik mit gemeinsamen Vereinbarungen haben das Potential, die Effizienz zu verbessern und Gesamtkosten zu reduzieren. Zusätzlich können aufwendige Investitionen und Risiken von beiden Partnern getragen werden (Franklin/Spinler 2011, Elbert et al. 2012).

Browne et al. (2007) entwickeln ein Framework um UCCs zu bewerten. Für diesen Zweck identifizierten sie Schlüsselfaktoren, die den Erfolg eines UCC beeinflussen sowie mögliche Barrieren bei der Implementierung eines UCC. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass eine

faire und wirtschaftlich tragbare Verteilung der Kosten und Erträge zwischen den beteiligten Partner essentiell für den Erfolg eines kooperativen UCC ist. Eine ex-ante Analyse eines geplanten UCC in Den Haag wurde durch van Duin et al. (2010) durchgeführt. Indem die Autoren ähnliche, bereits implementierte Konzepte untersuchen, können sie Bedingungen formulieren, unter denen ein UCC erfolgreich arbeiten kann. Sie zeigen, dass die Bereitschaft der Partner zur Kooperation essentiell ist. Außerdem kommen auch sie zu dem Schluss, dass die gewählte Methode zur Aufteilung der Kosten und Erträge zwischen den Partnern ein Schlüsselfaktor für den Erfolg von UCC darstellt. Allerdings argumentieren sie, dass eine faire und gleiche Verteilung der Kosten nur möglich ist, wenn eine neutrale Instanz, beispielsweise in Form der lokalen Gemeindeverwaltung, die Verantwortung hierfür übernimmt. Die Autoren Janjevic/Ndiaye (2017) fokussieren sich in einer Untersuchung speziell auf die Untersuchung der finanziellen Tragfähigkeit von UCC. Indem sie ein theoretisches Framework entwickeln, können sie zeigen, dass die finanzielle Tragfähigkeit von UCC häufig fragil ist und nur durch eine effiziente Nutzung der verfügbaren Ressourcen sowie eine effiziente Organisation der zugehörigen Distributionsprozesse sichergestellt werden kann.

Zusammenfassend lieferte die Literaturrecherche also einen Beleg, dass die Verteilung der zur Verfügung stehenden Ressourcen und der aus deren Nutzung entstehenden Kosten zwischen den beteiligten Partnern wesentliche Erfolgsfaktoren für kooperative urbane Logistikzentren darstellen. In diesem Zusammenhang konnte außerdem festgestellt werden, dass unterschiedliche Verhaltensweisen bzw. Eigenschaften der beteiligten Akteure zwar als wichtiger Einfluss auf den Erfolg oder Misserfolg eines UCCs in der Wissenschaft erkannt wurde, hierzu jedoch kaum Forschungsarbeiten existieren, die konkret die Auswirkungen unterschiedlicher (auch opportunistischer) Verhaltensweisen im Falle von UCCs systematisch untersuchen. Dieses Ergebnis unterstreicht folglich die Relevanz des vorliegenden Forschungsprojektes und unterstreicht den Bedarf eines Preismodells für kooperative urbane Logistikeinrichtungen, das kooperative Verhaltensweisen systematisch fördert.

2.2 Arbeitspaket 2 – Simulation des Verhaltens exemplarischer ULF

Zielsetzung und Ausgangslage: Die verhaltensbezogenen Aspekte der Nutzer kooperativer urbaner Logistikeinrichtungen werden mittels agentenbasierten Simulationsexperimenten detailliert analysiert. Die agentenbasierte Simulation (ABS) wird genutzt, da in diesen die Heterogenität des Verhaltens abgebildet werden kann. ABS ermöglicht es, Systeme mit komplexen Wirkzusammenhängen des Entscheidungsverhaltens der Agenten zu untersuchen, wobei das heterogene und interdependente Agentenverhalten auf der Mikroebene einen Effekt

auf das Gesamtsystem hat (Deckert/Klein 2010). Die ABS hat den Vorteil eines hohen Freiheitsgrads bei der Gestaltung der Simulation und kann somit das komplexe und divergente Verhalten hinsichtlich der kooperativen Nutzung von ULF abbilden. Innerhalb des agentenbasierten Simulationsmodells werden die verschiedenen Ausprägungen der Verhaltensarten der Kooperationspartner und die exemplarische Ausstattung und Umfang der potentiellen Logistikkapazitäten im ULF modelliert.

Als Simulationssoftware wird AnyLogic eingesetzt. AnyLogic bietet eine hohe Flexibilität für eine situationsabhängige Prozessdarstellung mit dem gewünschten Detaillierungsgrad. Im Bereich der agentenbasierten Simulation ist AnyLogic eine etablierte Software. Ein weiterer Vorteil ist die Möglichkeit, ein Java-Applet zu generieren, um eine betriebssystemunabhängige Visualisierung zu ermöglichen (Borshchev 2013).

Auch bei der Simulation erfolgt eine systematische Variation von Einflussfaktoren und der parallel in AP 3 erarbeiteten verhaltensbezogenen Aspekte. Zudem kann das in AP 4 identifizierte Preismodell in Abhängigkeit von verschiedenen Nutzungsverhalten verglichen werden. Mit den Simulationsexperimenten werden die Auswirkungen des Agentenverhaltens auf das Gesamtsystem nachgebildet. So kann das Kooperationsverhalten der KM-LDL für eine Logistikeinrichtung, wie ein Lager mit einer bestimmten Kapazität, mit verschiedenen Preismodellvarianten simuliert werden. Eine Bewertung der Ergebnisse erfolgt hinsichtlich der Anreizwirkung, also inwiefern durch ein geeignetes Preismodell eine Bereitschaft zur Kooperation erzeugt wird und inwiefern die KM-LDL auf Basis der Annahmen auch wirtschaftlich profitieren.

Für das Fazit werden die vorherigen Erkenntnisse aus dem Literaturstudium, den abschließenden Expertengesprächen und der Simulation zusammengeführt.

Vorgehen: Die Entwicklung des Simulationsmodells zu einem frühen Zeitpunkt der Projektbearbeitung bot die Möglichkeit, die Funktionalitäten des Modells und getroffene Annahmen mit Praxispartnern frühzeitig abzustimmen und darauf basierend das Modell stetig weiterzuentwickeln. So wurden die Mitglieder des Projektbegleitenden Ausschusses fortlaufend durch Experteninterviews und durch die Diskussion des Simulationsmodells bei Sitzungen des Projektbegleitenden Ausschusses in die Modellentwicklung eingebunden.

Da die Entwicklung des Simulationsmodells parallel zu den folgenden AP 3 und AP 4 fortgesetzt wurde, wird in diesem Abschnitt nur der generelle Aufbau und die Funktionsweise des Modells vorgestellt. Die jeweiligen Simulationsexperimente und deren Ergebnisse werden jeweils in den folgenden Ausführungen zu den Ergebnissen von AP 3 resp. AP 4 vorgestellt.

Da – wie bereits erläutert – entschieden wurde, den Fokus des Forschungsprojektes um die Betrachtung der urbanen Distribution zu erweitern, wurden zwei voneinander getrennte Simulationsmodelle entwickelt. Während das erste Modell die Prozesse innerhalb eines kooperativ betriebenen Lagers simuliert, fokussiert sich das zweite Modell auf eine kooperative Distribution in urbanen Räumen. Aus diesem Grund werden die Projektergebnisse im Folgenden jeweils getrennt nach den Ergebnissen für die kooperative Lagerhaltung und die kooperative urbane Distribution vorgestellt.

2.2.1 Simulation der Prozesse in kooperativen Lagern

Um unterschiedliche Verhaltensweisen der Lagernutzer zu simulieren und in der Folge ein Preismodell zu entwickeln und zu testen, das eine faire Nutzung der Ressourcen ermöglicht und die entstehenden Kosten und Erträge fair zwischen den Partnern aufteilt, wurde sich in Rücksprache mit den Partnern im projektbegleitenden Ausschuss dazu entschieden, ein stark vereinfachtes Modell eines Lagerhauses abzubilden, welches lediglich von zwei Nutzern A und B gleichzeitig genutzt wird. Die Beschränkung auf zwei Nutzer ermöglicht es, die sich in der Simulation einstellenden Effekte und Kosten isoliert für jeden Partner betrachten zu können. Ein ähnliches Vorgehen wurde auch bei Vanovermeire und Sörensen (2014) genutzt, welche ebenfalls Kooperationen in der Logistik bestehend aus nur zwei Partnern untersuchen.

Als Lagerhaus wurde ein rechteckiges Layout mit zehn Gängen und insgesamt 1000 gleichgroßen Lagerplätzen gewählt (50 auf jeder Seite eines Ganges). Vergleichbare Layouts werden häufig in der wissenschaftlichen Literatur genutzt (siehe z.B. Grosse et al. 2014; Hong/Kim 2017; Petersen/Aase 2004). Jeder Gang besitzt eine Breite von einem und eine Länge von sechzehn Metern. Jeder Lagerplatz verfügt über eine Tiefe von 0,4 m, was einen Abstand von 1,8 m zwischen den Mittellinien benachbarter Gänge zur Folge hat. An einer Seite des Lagers befindet sich ein Depot, das als Ausgangspunkt der Kommissionierung dient und zu dem aus dem Lager kommissionierte Artikel gebracht werden. Das Layout des Lagers im Simulationsmodell ist in Abbildung 2 dargestellt. Wie man der Abbildung entnehmen kann, verfügt das Lager über zwei Quer-Gänge, jeweils am Ende der Regalzeilen.

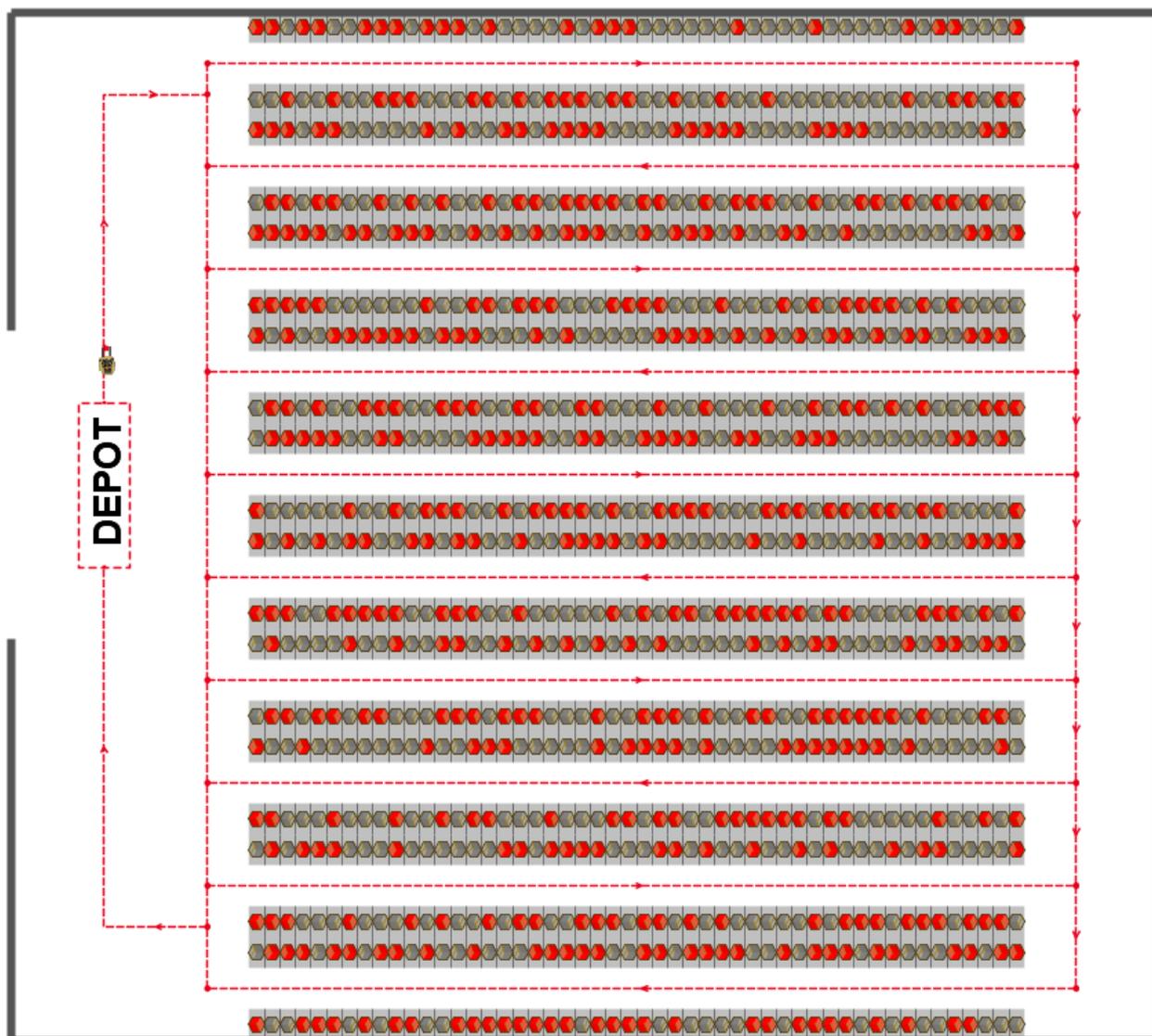


Abbildung 2: Das Lagerlayout, das in der Simulation genutzt wurde

Während des Betriebs des Lagers werden Artikel beider Partner im Lagerhaus eingelagert. Die Lagerplatzverteilung erfolgt dabei für beide Partner nach dem Zufallsprinzip, wobei jeweils einer der freien Lagerplätze bei der Einlagerung mit Hilfe einer uniformen Verteilungsfunktion ausgewählt wird. Zu bestimmten Zeitpunkten während der Modelllaufzeit platzieren die Nutzer Bestellungen. Diese enthalten jeweils eine bestimmte Anzahl an Artikeln, die aus dem Lager kommissioniert und zum Depot gebracht werden sollen. Für die Generierung der Kommissionieraufträge gibt es im Modell zwei Möglichkeiten: Die erste Möglichkeit besteht darin, Nachfragekurven vorzugeben, die die Häufigkeit des Bestelleingangs durch die Partner vorgeben. Bei der zweiten Möglichkeit wird die Gesamtzahl der Bestellungen pro Nutzer vor dem Start der Simulation festgelegt. Anschließend werden diese Bestellungen vor dem Start der Simulation zufällig über die Modelllaufzeit verteilt, wobei ausgewählt werden kann, ob die Verteilung der Bestellungen einem uniformen oder normalverteilten Verlauf folgen soll. Im Falle

einer normalverteilten Verteilung der Bestellungen über den Simulationszeitraum können darüber hinaus die Parameter der Verteilungsfunktion (Mittelwert und Standardabweichung) festgelegt werden. Dieses Vorgehen ermöglicht es, Nachfragespitzen zu bestimmten Zeiten zu simulieren, ohne die Gesamtzahl der Bestellungen verändern zu müssen. Auch wenn eine bereits beim Start der Simulation bekannte Anzahl und Verteilung der Bestellungen als unrealistisch für die Praxis angesehen werden kann, ermöglicht dieses Vorgehen durch das gezielte Beeinflussen einzelner Modellparameter einen präzisen Vergleich der Auswirkungen des entwickelten Preismodells unter unterschiedlichen Nachfrageverläufen. Indem die Gesamtzahl der Bestellungen je Nutzer im Vorfeld festgelegt und nicht verändert wird, wird eine Analyse allein auf Basis der unterschiedlichen Verteilung der Bestelleingänge ermöglicht.

Die Auswahl der Artikel je Bestellung erfolgt ebenfalls zufällig mit Hilfe einer uniformen Verteilungsfunktion, welche dafür sorgt, dass jeder verfügbare Artikel eines Nutzers im Lager über die gleiche Wahrscheinlichkeit verfügt, einer Bestellung des jeweiligen Nutzers zugeordnet zu werden. Die eigentliche Kommissionierung wird durch einen Kommissionierer durchgeführt, der sich in Form einer Schleifengang-Strategie (S-Shape) durchs Lager bewegt und Artikel beider Nutzer während einer Tour kommissionieren kann. Es handelt sich im Simulationsmodell also um ein Person-zur-Ware-Kommissioniersystem mit Multi-Order-Kommissionierung. Die Schleifengang-Strategie wurde ausgewählt, da sie häufig in der Praxis angewandt wird und eine effiziente Lösung für Tourenplanungsprobleme in Kommissionierlagern liefert (Hong/Kim 2017). Der Kommissionierer bewegt sich in der Simulation mit einer konstanten Geschwindigkeit von einem Meter pro Sekunde. Laut Elbert und Müller (2017), die die Gehgeschwindigkeiten menschlicher Kommissionierer in Person-zur-Ware-Systemen untersucht haben, handelt es sich dabei um eine realistische Annahme für die Gehgeschwindigkeit. Auch wenn es sich hierbei nicht um ein realistisches Szenario handelt, wurde entschieden, lediglich einen Kommissionierer im Lager zu simulieren. Betrachtet man die vorhandene Kommissionierkapazität als Ressource im gemeinsam genutzten Lager, so ermöglicht es die Beschränkung auf nur einen Kommissionierer, die Auswirkungen unterschiedlicher Verhaltensweisen unter begrenzter Verfügbarkeit der Ressourcen zu betrachten. Zudem erlaubt es dieses Vorgehen, unerwünschte Effekte aus dem Modell zu eliminieren, die aus der Interaktion zwischen Kommissionierern entstehen und nicht im Fokus dieser Untersuchung liegen (z.B. gegenseitiges Blockieren von Kommissionierern in engen Gängen, siehe dazu z.B. Franzke et al. 2017).

Nachdem eine Bestellung durch einen Nutzer aufgegeben wurde, wird diese dem Kommissionierer nach dem FIFO-Prinzip zugeordnet. Der Kommissionierer startet daraufhin sofort seine Tour, indem er das Depot verlässt und nacheinander alle Artikel des Auftrages aus dem Lager entnimmt, bis alle Bestellungen abgearbeitet oder seine maximale Tragekapazität

erreicht wurde. In beiden Fällen macht sich der Kommissionierer anschließend auf den Rückweg zum Depot, wo er die kommissionierten Artikel ablädt. Sollten noch unvollständige Bestellungen vorliegen, setzt der Kommissionierer daraufhin seine Tour fort. Wenn keine Bestellungen mehr vorliegen, wartet der Kommissionierer im Depot bis ihm eine neue Bestellung zugewiesen wird.

Die Zeit, die der Kommissionierer für die Entnahme eines Artikels benötigt, kann im Vorfeld der Simulation als deterministischer Wert für jeden Nutzer getrennt festgelegt werden. Es ist zu beachten, dass das Wiederauffüllen des Lagers nicht simuliert wurde, da es nicht im Fokus der zu Grunde liegenden Fragestellung liegt. Stattdessen werden alle entnommenen Artikel automatisch ersetzt um sicherzustellen, dass zu jedem Zeitpunkt ausreichend Artikel für das Abschließen der Bestellungen im Lager vorhanden sind.

Zusammenfassend wurden vier verschiedene Arten von Agenten für die Simulation simuliert: Die beiden Nutzer des Lagers, der Kommissionierer, die eingelagerten Artikel sowie die Bestellungen der Nutzer. Vor jedem Simulationsdurchlauf müssen die folgenden Simulationsparameter festgelegt werden:

- der Anteil an den 1000 insgesamt vorhandenen Lagerplätzen für jeden Nutzer
- die simulierte Zeit eines Simulationsdurchlaufes
- die Anzahl der Bestellungen je Nutzer und die zugehörige Verteilungsfunktion (uniform oder normalverteilt mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ
oder
- der den Bestellungen zugrunde liegende Nachfrageverlauf
- die Anzahl der Artikel je Bestellung
- die Zeit, die der Kommissionierer für die Entnahme eines Artikels jedes Nutzers benötigt
- die Tragekapazität des Kommissionierers

Das Simulationsmodell wurde während der Projektbearbeitung fortwährend validiert und verifiziert. Hierfür wurden zum einen die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses und das Feedback der Praxispartner genutzt. Zum anderen wurden speziell für den Zweck der Verifizierung zahlreiche Simulationsdurchläufe durchgeführt, wobei einzelne Parameter systematisch variiert und die Simulationsergebnisse sorgfältig geprüft wurden. Dabei wurde beispielsweise geprüft, ob die Anzahl der insgesamt kommissionierten Artikel mit der Anzahl der insgesamt bestellten Artikel übereinstimmt, um sicherzustellen, dass jeder bestellte Artikel auch während der Laufzeit der Simulation kommissioniert wird.

2.2.2 Simulation der urbanen Distribution

Um verschiedene Fragestellungen im Kontext der kooperativen urbanen Distribution zu erforschen, wurde ein Simulationsmodell, welches die Bündelung von Güterströmen im urbanen Raum aus verschiedenen Gesichtspunkten analysieren kann, erstellt. Mittels des entwickelten Modells lassen sich sowohl klassische Distributionssysteme ohne Kooperation der Akteure als auch kooperative Distributionssysteme mit Einrichtungen zur unternehmensübergreifenden Bündelung vergleichen. Für letztere liegt der Fokus hierbei insbesondere auf sogenannten Urban Consolidation Centern (UCC), welche stadtnahe logistische Einrichtungen zur unternehmensübergreifenden Konsolidierung von städtischen Güterströmen mit dem Ziel, den Güterverkehr zu reduzieren, darstellen (Allen et al. 2012).

Konzeptionelles Modell

Angelehnt an das Vorgehensmodell von Manuj et al. (2009) für die Konzeption, Implementierung und Evaluierung von Simulationsmodellen im Bereich der Logistik und des Supply Chain Managements, wurde ein mehrstufiger Prozess zur Entwicklung des Simulationsmodells gewählt. Im ersten Schritt, der Problemformulierung, wurde gemeinsam mit den Praxispartnern festgelegt, dass das Simulationsmodell sowohl kooperative als auch nicht-kooperative Distributionsszenarien abbilden soll, sodass sowohl aktorspezifische Auswirkungen (z. B. Distributionskosten) als auch aktorsübergreifende Folgen der kooperativen und nicht-kooperativen Distributionsszenarien (z. B. Verkehrsaufkommen) verglichen werden können. In der Diskussion mit den Praxispartnern des projektbegleitenden Ausschusses wurde dabei deutlich, dass urbane Distributionsprozesse aufgrund unterschiedlicher Sendungsgrößen, Distributionsstrukturen und Kundenanforderungen differenziert betrachtet werden müssen und somit heterogene Agenten definierbar sein müssen.

Im zweiten Schritt des Modellierungsprozesses wurden die Einflussgrößen und Zielgrößen des Modells definiert. Angelehnt an das Simulationsframework zur Untersuchung von UCCs von van Heeswijk et al. (2016) und dem Modell von van Duin et al. (2012), wurden verschiedene Akteure als Agenten definiert. Bei den berücksichtigten Agenten des konzeptionellen Modells handelt es sich um Logistikdienstleister, Warenempfänger, UCC-Betreiber und den Gesetzgeber, bzw. die Stadtverwaltung. Jeder Agententyp besitzt dabei eine Reihe von Einflussgrößen, mittels welcher unterschiedliche Ausprägungen der Akteure definiert werden können (siehe Tabelle 1). Beispielsweise können Warenempfänger anhand der Anlieferhäufigkeiten, Liefermengen, Lieferanten, Güterarten und des Standorts differenziert werden. Im Gegensatz zu anderen Ansätzen aus der Forschung lassen sich im Modell neben städtischen Warenempfängern auch außerstädtische Warenempfänger aus dem Umland abbilden, da diese teilweise in den selben Touren wie die städtischen Warenempfänger beliefert

werden und somit die Distribution und deren Kosten beeinflussen. Die Logistikdienstleister lassen sich bezüglich des Marktanteils, der Kundenstruktur, des Standorts oder auch der Fahrzeugflotte (Anzahl und Fahrzeugtypen) unterscheiden. Die Stadtverwaltung, welche über die Szenarien gesteuert wird, verfügt zwar über keine eigenen Ressourcen im Modell, kann aber neben den grundlegenden Rahmenbedingungen (z. B. Arbeitszeitgesetze) über die Einführung von Verkehrsrestriktionen Einfluss auf die Distribution der Logistikdienstleister- und UCC-Agenten nehmen. Konkret können dabei Lieferzeitfenster, eine zonenbasierte City-Maut und Zufahrtsbeschränkungen für bestimmte Fahrzeugtypen erlassen werden.

Tabelle 1: Definierbare Eigenschaften der Agententypen.

Agent	Eigenschaften
Warenempfänger	<ul style="list-style-type: none"> – Standort – Lieferhäufigkeit je Woche – Liefermenge je Auftrag – Anzahl und Menge der möglichen Logistikdienstleister – Sendungsgewicht – Sendungsvolumen – Güterart
Logistikdienstleister	<ul style="list-style-type: none"> – Standort – Marktanteil – Anzahl und Menge der Warenempfänger – Fahrzeugflotte (Art und Anzahl)
Urban Consolidation Center	<ul style="list-style-type: none"> – Standort – Fahrzeugflotte (Art und Anzahl)

Neben den Ausprägungen der heterogenen Agenten, sind die Interaktionen zwischen den Agenten ein wesentlicher Bestandteil des Simulationsmodells. Ein Überblick der Interaktionen zwischen den Agenten ist in Abbildung 3 dargestellt. Ausgangspunkt der Simulation sind die Warenempfänger, welche basierend auf ihren jeweiligen Nachfrageparametern stochastisch Transportaufträge generieren und diese an einen ihrer potenziellen Logistikdienstleister weiterleiten. In Rücksprache mit den Teilnehmern des projektbegleitenden Ausschusses gehen wir dabei davon aus, dass alle Waren in den Depots der Logistikdienstleister auf Lager sind und berücksichtigen daher keine Verloader, bei denen die Waren abgeholt werden müssen. Schließlich fokussieren sich die zu untersuchenden Kooperationsmöglichkeiten ausschließlich auf die städtische Distribution. Abhängig davon, ob ein kooperatives oder nicht-kooperatives Distributionsszenario analysiert wird, transportieren die Logistikdienstleister die städtischen Sendungen entweder zu einer kooperativen logistischen Einrichtung zur

unternehmensübergreifenden Konsolidierung (UCC) oder direkt zu den jeweiligen Warenempfängern. Für die kooperativen Distributionsszenarien führt das UCC nach Übergabe der Sendungen durch die Logistikdienstleister die gebündelte Distribution im Stadtgebiet durch und beliefert die Warenempfänger. Aufgrund dessen, dass anhand des Modells die Unterschiede zwischen den kooperativen und nicht-kooperativen Distributionsszenarien untersucht werden sollen, fokussiert sich das Modell vordergründig auf die monetären Ströme zwischen den Logistikdienstleistern und den UCCs, welche im Zuge der Kostenaufteilung der kooperativen Distribution anfallen. Die monetären Ströme zwischen den Logistikdienstleistern und Warenempfängern für die Durchführung bzw. Organisation des Transports werden daher nicht berücksichtigt. Im Modell setzen sich die Kosten für die Distribution aus Transport-, Handling- und Fixkosten zusammen. Die Transportkosten fallen sowohl für Logistikdienstleister als auch UCC-Betreiber an und können aus zeitabhängigen Kosten (z. B. Lohnkosten), distanzabhängigen Kosten (z. B. Kraftstoffkosten) und möglichen Fixkosten (z. B. Leasinggebühr des Fahrzeugs je Tag oder City-Maut) bestehen. Die Handlingkosten (je Transportmenge) und tour-unabhängigen Fixkosten (z. B. Overheadkosten) werden dagegen nur bei den UCC-Betreibern betrachtet, da angenommen wird, dass kooperative Distribution keine Veränderung der Handling- und Fixkosten der Logistikdienstleister hervorruft. Für die Aufteilung der UCC-Kosten lassen sich im konzeptionellen Modell unterschiedliche Methoden zur Kostenaufteilung auswählen (proportional, Shapley-Value, Equal-Profit-Methode).

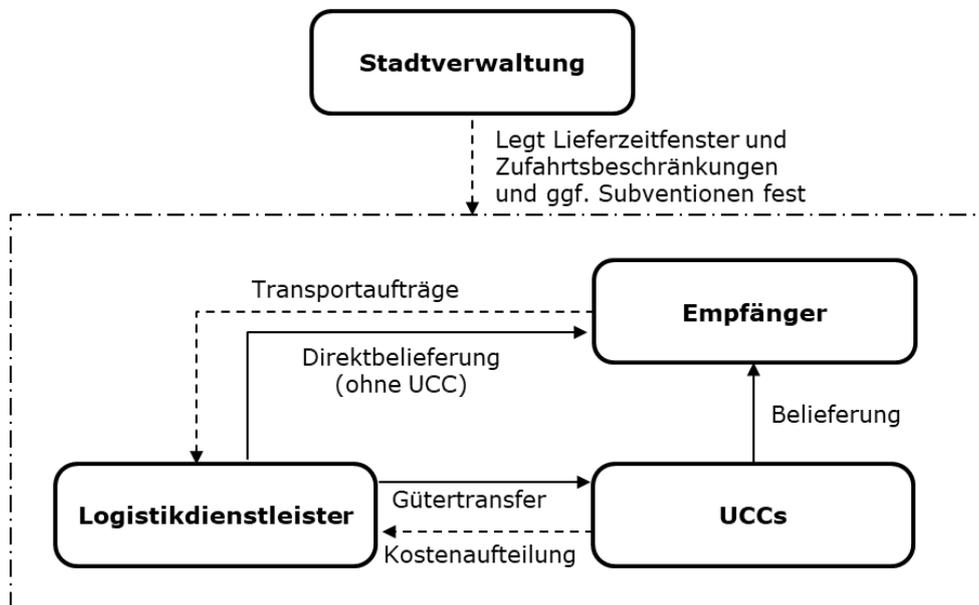


Abbildung 3: Überblick über die Interaktionen zwischen den Agenten der Simulation.

Implementierung des Modells

Nach Abschluss der Validierung durch die beteiligten Praxispartner wurde das konzeptionelle Modell als computerbasiertes Modell in der Simulationssoftware AnyLogic 8.2.3, welche ereignisdiskrete und agentenbasierte Modellierungstechniken bietet, implementiert. Das implementierte Modell besteht aus verschiedenen Modulen und erlaubt die Verwendung von Datenbanken zum Einlesen von Standortdaten, unterschiedlicher Agentenprofilen (z. B. für Warenempfänger) und Fahrzeugtypdaten (Kosten-, Leistungs- und Emissionsdaten). Ein Überblick über die Modellarchitektur findet sich in Abbildung 4. Weiterhin können benutzerdefinierte Einstellung über eine grafische Benutzeroberfläche vorgenommen werden. Um die Distributionsszenarien möglichst realitätsnah zu simulieren werden im computerbasierten Modell GIS-Daten verwendet, wodurch reale Standorte und fahrzeugtypabhängige Routingdaten genutzt werden können. Für die Planung der Distributionstouren der Logistikdienstleister und UCC-Betreiber wird Tourenplanungsalgorithmus jsprit (Schröder 2017) zum Lösen von sogenannten „Rich Vehicle Routing Problems“ verwendet (vgl. Lahyani et al. 2015). Der eingesetzte Tourenplanungsalgorithmus ist dabei von den Arbeiten von Schrimpf et al. (2000) und Pisinger/Ropke (2007) inspiriert. Für die Verifikation des Simulationsablaufes und Auswertung der Simulationsläufe stehen diverse Echtzeit Visualisierungsmöglichkeiten zur Verfügung (z. B. bezüglich der Kosten und Verkehrsauswirkungen). Darüber hinaus lassen sich die Zielgrößen der Simulation in Datenbanken speichern.

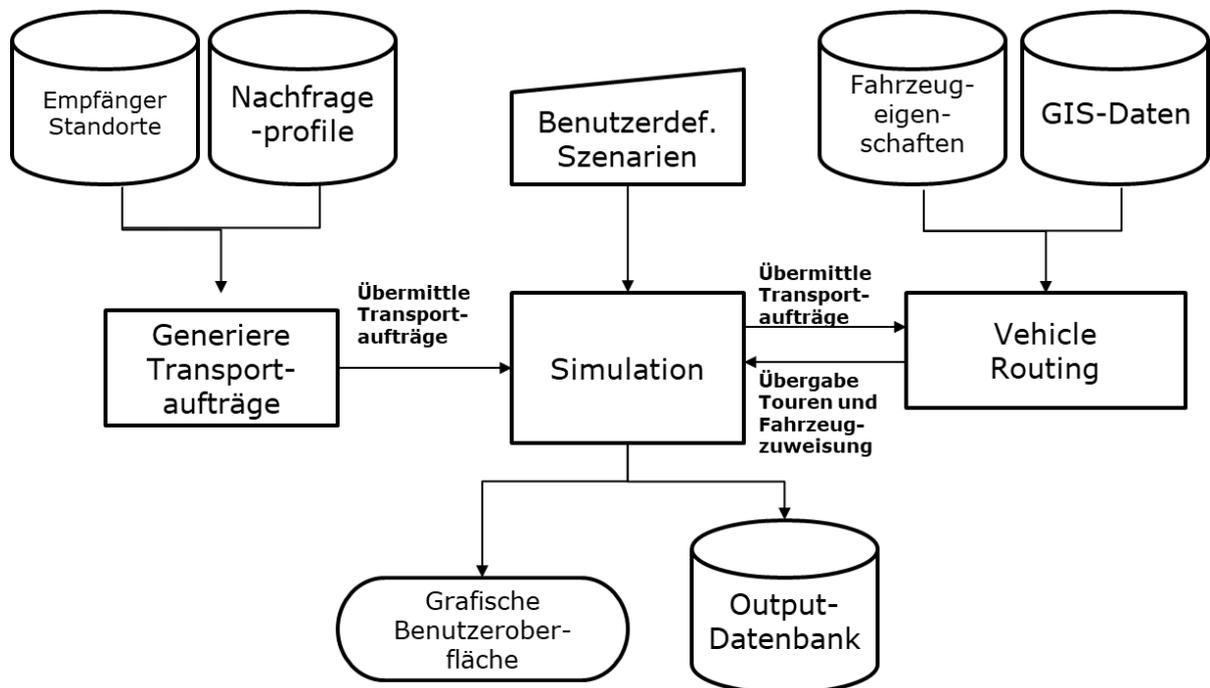


Abbildung 4: Modellarchitektur des entwickelten Simulationsmodells.

Zusammenfassend wurde ein computerbasiertes Simulationsmodell mit heterogenen Agenten entwickelt, mittels dessen sich verschiedene Fragestellungen der kooperativen urbanen Distribution untersuchen lassen, entwickelt. Im Gegensatz zu den bisherigen Modellen aus der Literatur zeichnet sich das Modell dabei insbesondere durch eine hohe Komplexität und Realitätsnähe aus. Beispielsweise lassen sich reale Kartendaten, heterogene Fahrzeugflotten mit unterschiedlichen Routingprofilen, vielfältige Agenteneigenschaften und Rahmenbedingungen definieren. Um die Praxisrelevanz des Modells zu gewährleisten, wurden die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses zur Validierung des Modells und dessen Ergebnissen genutzt, sodass das Modell kontinuierlich weiterentwickelt wurde. Darüber hinaus wurden Testläufe und Sensitivitätsanalysen zur Verifikation des Modells durchgeführt, und das Modellverhalten geprüft.

2.3 Arbeitspaket 3 – Untersuchung verhaltensbezogener Aspekte

Zielsetzung und Ausgangslage: Das Ziel des Arbeitspaketes 3 besteht darin, mögliche Verhaltensweisen der Akteure innerhalb einer Logistikkoooperation systematisch zu untersuchen, damit diese anschließend im Simulationsmodell implementiert und deren Auswirkungen analysiert werden können.

Auf Basis spieltheoretischer Literatur konnte bereits die Abgrenzung sogenannter Leader-Follower-Beziehungen von Beziehungen auf Augenhöhe als relevant für die vorliegende Untersuchung erkannt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes sollen gemeinsam mit den Praxispartnern konkrete Ausprägungen dieser Beziehungen definiert und mögliche Aspekte für die Simulation erarbeitet werden.

Im Rahmen des dritten Arbeitspaketes wurde daher der Fokus auf die Untersuchung des Einflusses unterschiedlichen Nachfrageverhaltens durch die Partner auf die manuelle Kommissionierung gelegt. Dies wurde daher in das in Arbeitspaket 2 erstellte Simulationsmodell, bestehend aus zwei Partnern und einem gemeinsam genutzten Kommissionierer, implementiert.

Im Bereich der urbanen Distribution wurde der Fokus auf die Untersuchung der Wirkung von akteursspezifischen und akteursübergreifenden Einflussfaktoren auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Kooperationen in der urbanen Distribution gelegt. Denn viele Kooperationen im Transportbereich scheiterten in der Praxis aufgrund mangelnder Wirtschaftlichkeit (vgl. z. B. van Duin et al. 2010), sodass die Voraussetzung eines Kooperationsvorteils, den es aufzuteilen gilt, nicht gegeben ist.

Vorgehen: Die Beschreibung des Vorgehens im dritten Arbeitspaket erfolgt analog zum zweiten Arbeitspaket getrennt für die Bereiche kooperative Lagerhaltung und kooperative urbane Distribution. In beiden Bereichen wurden die jeweils zuvor beschriebenen Simulationsmodelle weiterentwickelt und zur Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren verwendet.

2.3.1 Verhaltensbezogene Aspekte in kooperativen Lagern

Insbesondere die kooperative Kommissionierung wurde als bedeutender Leistungsbereich erkannt, auf den im Rahmen der weiteren Untersuchung und Simulation ein besonderer Fokus gelegt werden soll. Tatsächlich kommen in der Praxis vor allem lockere Kooperationen im Bereich der gemeinsamen Lagerhaltung vor (v.a. so genannte Warehouse-within-Warehouse-Lösungen), in denen Partner zwar gemeinsame Lager betreiben, hier jedoch in getrennten Bereichen operieren und die Kommissionierung jeweils individuell organisieren. Dies steht in starkem Widerspruch zu den Synergien, die durch eine kooperative Kommissionierung potentiell generiert werden können. Es wird daher vermutet, dass vor allem organisatorische Herausforderungen sowie die Gefahr der Beeinflussung (zeit-)kritischer Prozesse in der Kommissionierung durch den oder die Praxispartner ursächlich dafür sind, dass eine kooperative Kommissionierung in der Praxis kaum vorkommt. Dieser Aspekt erscheint daher insbesondere auch für den nachhaltigen wirtschaftlichen Erfolg kooperativer urbaner Logistikzentren von großer Bedeutung.

Zur Datenaufnahme wurden mehrere Maßnahmen mit Akteuren rund um das Thema kooperative Kommissionierung/Logistikkoperationen durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchung von Kooperationen innerhalb eines Lagers wurde zunächst gemeinsam mit den Praxispartnern erarbeitet, welche Verhaltensweisen einen direkten Einfluss auf die Leistung der übrigen Partner im Lager haben. Hierbei wurde erkannt, dass insbesondere die Berücksichtigung von Nachfragespitzen für die Simulation kooperativer Kommissionierprozesse relevant ist. Daher wurde entschieden, für die Simulation feste Nachfrageverläufe als Eingangsgröße zu verwenden. Außerdem wurde gemeinsam mit den Praxispartnern festgelegt, welche Ausgabegrößen aus dem Modell für die Analyse relevant sind. Folgende Ausgabegrößen wurden dabei festgelegt:

- die Durchlaufzeit jeder Bestellung
- die gesamte Arbeitszeit des Kommissionierers, die sich aus Laufzeit und Entnahmezeiten der Artikel zusammensetzt
- der Anteil der Arbeitszeit des Kommissionierers, der jeweils auf die Kommissionierung der Artikel eines einzelnen Nutzers entfällt

Die Durchlaufzeiten der Bestellungen werden dabei zu dem Zeitpunkt berechnet, wenn der letzte Artikel der Bestellung kommissioniert wurde und im Depot eintrifft. Dazu wird die Zeitdifferenz zwischen diesem Zeitpunkt und dem Zeitpunkt, zu dem die Bestellung vom Nutzer aufgegeben wurde, ermittelt und der Betrag in eine Datenbank geschrieben. Die Arbeitszeit des Kommissionierers umfasst die gesamte Zeit, während der der Kommissionierer nicht im Depot auf neue Bestellungen wartet. Die gesamte Arbeitszeit t kann folglich aufgeteilt werden in die Laufzeit t_w und die Kommissionierzeit t_p , die benötigt wird, um Artikel aus dem Regal zu entnehmen: $t = t_w + t_p$. Der Anteil der Arbeitszeit des Kommissionierers je Nutzer ist definiert als der prozentuale Anteil der gesamten Arbeitszeit des Kommissionierers, der dem jeweiligen Nutzer direkt zugerechnet werden kann. Die Laufzeit und die Kommissionierzeit werden dabei getrennt voneinander betrachtet. Die Kommissionierzeit kann dabei relativ leicht aufgeteilt werden, indem einfach die Zeiten für die Kommissionierung der Artikel für jeden Nutzer getrennt summiert werden. Die Laufzeit einer Tour wird dagegen proportional basierend auf der gesamten Laufzeit des Kommissionierers t_w^{total} einer einzelnen Tour zwischen den beiden Nutzern aufgeteilt, wobei die Anzahl der in dieser Tour kommissionierten Artikel des jeweiligen Nutzers als Aufteilungsfaktor herangezogen wird. Das heißt, dass sich die Laufzeit des Kommissionierers für Nutzer A, t_w^A , wie folgt berechnet:

$$t_w^A = t_w^{total} \frac{n_A}{n_A + n_B}, \quad (1)$$

wobei n_A die Anzahl der in dieser Tour kommissionierten Artikel von Nutzer A und n_B respektive die Anzahl der in dieser Runde kommissionierten Artikel von Nutzer B bezeichnet. Im Rahmen dieses Projektes wurde dieses Verfahren der proportionalen Aufteilung der Laufzeiten als hinreichend genau angesehen, da die Artikelpositionen einer Bestellung und damit jeder Tour zufällig über das gesamte Lager verteilt sind und Lagerplätze mit der gleichen Wahrscheinlichkeit einem der beiden Nutzer zugeordnet werden. Für einen Fall, in dem die Artikel nicht zufällig verteilt sind, können die Laufzeiten jedoch nicht nach der oben beschriebenen Methode aufgeteilt werden, da Nutzer, deren Artikel näher am Depot gelagert werden, für einen geringeren Anteil an der gesamten Laufzeit des Kommissionierers verantwortlich sind.

Die Nachfrageverläufe, welche als Eingangsgröße in das Modell gegeben werden, geben eine Frequenz an, mit der die einzelnen Nutzer Bestellungen an das Lager abgeben. Um analysieren zu können, wie sich ein unterschiedliches Nachfrageverhalten auf die Nutzung der gemeinsamen Ressourcen im Lager auswirkt, wurde die Bestellfrequenz systematisch für

Nutzer A variiert. In einer ersten Simulation werden zunächst Bestellfrequenzen zwischen einer und 20 Bestellungen pro Stunde für Nutzer A simuliert. Die Bestellfrequenz von Nutzer B wird dabei in jedem Simulationslauf bei einem konstanten Wert von zehn Bestellungen pro Stunde belassen. Diese Konfiguration erlaubt es, ein Szenario in dem beide Nutzer die gleiche Nachfrage aufweisen mit verschiedenen Szenarien mit ungleicher Nachfrage zu vergleichen. Für die Simulation wurden jedem Nutzer genau 50 % der vorhandenen Lagerplätze, d.h. 500 Lagerplätze pro Nutzer, zugeordnet. Der vorhandene Lagerplatz ist somit in jedem Simulationsdurchlauf gleich zwischen beiden Nutzern aufgeteilt. Auf diese Weise konzentriert sich das Modell auf die Nutzung des Kommissionierers als gemeinsam genutzte Ressource, die isoliert von anderen Einflüssen betrachtet werden kann. Jedes Bestellszenario wurde über eine Modellzeit von insgesamt acht Stunden simuliert; es wurde also jeweils ein vollständiger Arbeitstag simuliert. Allerdings wurde das Modell so konfiguriert, dass Bestellungen nur in den ersten sieben Stunden der Laufzeit aufgegeben werden können. So wurde sichergestellt, dass in der letzten Stunde alle noch offenen Bestellungen bearbeitet werden und so alle Bestellungen während der Laufzeit bearbeitet werden. Die Tragekapazität des Kommissionierers wurde auf 20 Artikel festgelegt und die Anzahl der Artikel pro Bestellung auf fünf. Die benötigte Zeit für die Entnahme eines Artikels wurde für beide Nutzer auf zehn Sekunden gesetzt. Diese Werte wurden gewählt, da vorangegangene Analysen im Modell gezeigt haben, dass mit diesen Parametern sichergestellt ist, dass für jede Bestellfrequenz alle Bestellungen während der achtstündigen Modelllaufzeit vollständig bearbeitet werden können. Alle übrigen Parameter wurden bei den Werten belassen, die in Kapitel 2.2.1 angegeben wurden. Die Parameterwerte für die Simulation sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Parameterwerte für die Simulation.

Parameter	Wert für Nutzer A	Wert für Nutzer B
Anzahl Lagerplätze	500	500
Bestellfrequenz	1-20 Bestellungen pro Stunde	10 Bestellungen pro Stunde
Artikel pro Bestellung	5 Artikel	5 Artikel
Entnahmezeit pro Artikel	10 s	10 s
Kapazität des Kommissionierers		20 Artikel
Laufgeschwindigkeit des Kommissionierers		1 m/s

In der Analyse der Ergebnisse wurde zunächst die Verteilung der Arbeitszeit des Kommissionierers auf die einzelnen Nutzer betrachtet. Die Ergebnisse eines einzelnen

Simulationsdurchlaufes jeweils für verschiedene Bestellfrequenzen von Nutzer A sind in Abbildung 5 dargestellt. Aus Basis der Ergebnisse für jeden Nutzer wurde zudem ein Polynom als Anpassungskurve mit Hilfe der Kleinste-Quadrate-Methode berechnet und in Abbildung 5 als gepunktete Linie dargestellt. Wie die Abbildung zeigt ist Nutzer A nur für 10 % der Arbeitszeit des Kommissionierers verantwortlich, wenn seine Bestellfrequenz bei nur einer Bestellung pro Stunde liegt. Wenn seine Bestellfrequenz jedoch bei 20 Artikeln pro Stunde liegt, kann ihm dagegen für 70 % der Arbeitszeit des Kommissionierers zugerechnet werden.

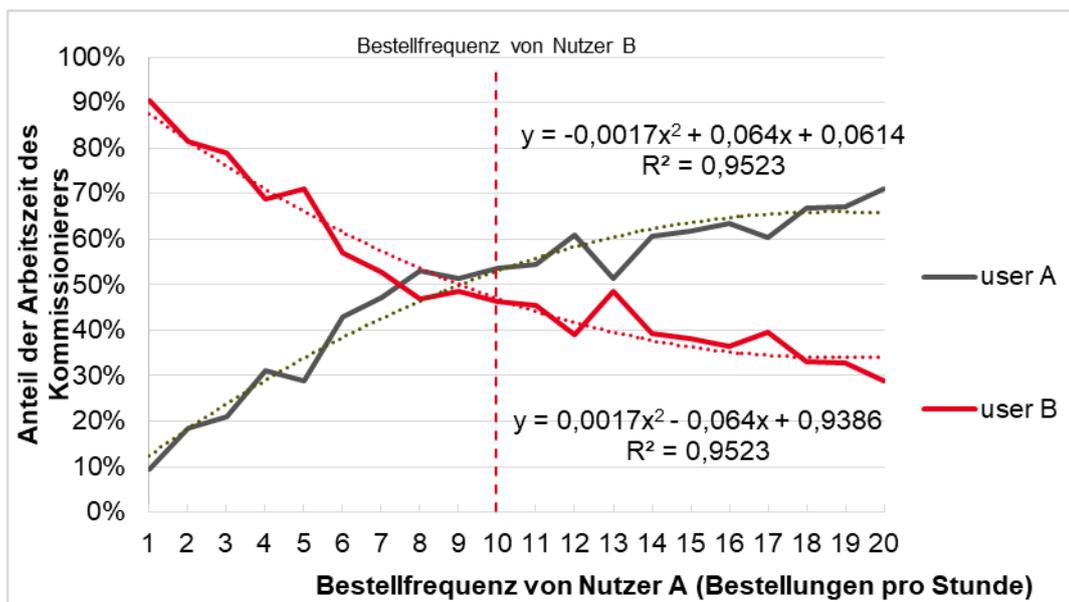


Abbildung 5: Anteil der Arbeitszeit des gemeinsam genutzten Kommissionierers, der jedem Nutzer (user) zugerechnet werden kann.

Die Gleichung für das Anpassungspolynom für Nutzer A sowie die erste und zweite Ableitung lauten wie folgt:

$$y_A = -0,0017x^2 + 0,064x + 0,0614 \quad (2)$$

$$y'_A = -0,0034x + 0,064 \quad (3)$$

$$y''_A = -0,0034 \quad (4)$$

Wie die Gleichungen 2 bis 4 zeigen steigt der Anteil der Kommissionierzeit nicht proportional mit der Anzahl an Bestellungen. Stattdessen steigt der Anteil für niedrige Bestellfrequenzen schneller als bei hohen. Die erste Ableitung ergibt einen Gradienten von 6,06 % für eine Bestellfrequenz von einer Bestellung pro Stunde. Im Falle einer Frequenz von zehn Bestellungen pro Stunde, stellt sich lediglich ein Gradienten von 3,00 % ein. Der degressive Verlauf erklärt sich durch den Fakt, dass der Kommissionierer stets sofort eine neue Tour startet, nachdem eine Bestellung eingeht. Das bedeutet, dass der Picker bei niedriger

Bestellfrequenz die meisten Bestellungen in einer eigenen Tour kommissioniert. Dadurch nimmt die Arbeitszeit des Kommissionierers mit jeder zusätzlichen Bestellung zu, während seine Wartezeit im Depot abnimmt. Bei höheren Bestellfrequenzen liegen häufig bereits neue Bestellungen vor, sobald der Kommissionierer zum Depot zurückkehrt. Dadurch kann der Kommissionierer direkt mit der Kommissionierung fortfahren, ohne im Depot auf Aufträge warten zu müssen. Ab einer bestimmten Bestellfrequenz oberhalb von 20 Bestellungen pro Stunde ist die maximale Kapazität des Kommissionierers erreicht. Ab diesem Punkt steigt die gesamte Arbeitszeit des Kommissionierers nicht weiter, auch wenn neue Bestellungen eingehen. Auf Grund der FIFO-Regel, mit der Bestellungen bearbeitet werden, würde sich der Anteil der Arbeitszeit für Nutzer A also irgendwann dem Wert von 100 % annähern.

Um den Einfluss der Bestellfrequenz auf die Durchlaufzeiten der Aufträge jedes Nutzers zu ermitteln, wurden insgesamt jeweils 100 Simulationsdurchläufe für jede einzelne Bestellfrequenz durchgeführt und jeweils der Mittelwert der Durchlaufzeiten für die Bestellungen berechnet. Die Ergebnisse für die mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen jedes Benutzers sowie deren Standardfehler sind in Tabelle 3 angegeben.

Tabelle 3: Mittlere Durchlaufzeiten der Bestellungen jedes Nutzers, ermittelt aus jeweils 100 Simulationsläufen pro Bestellfrequenz von Nutzer A und einer konstanten Bestellfrequenz von 10 Bestellungen pro Stunde für Nutzer B (Standardfehler jeweils in Klammern).

Bestellfrequenz von Nutzer A (Bestellungen / Stunde)	1	2	3	4	5	6	7
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer A	7 (3)	14 (4)	21 (4)	28 (6)	35 (6)	42 (7)	48 (6)
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer B	71 (9)	70 (8)	70 (8)	69 (8)	69 (7)	70 (8)	70 (9)
Mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen für Nutzer A	294 (56)	303 (42)	326 (41)	328 (35)	337 (33)	359 (36)	376 (35)
Mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen für Nutzer B	289 (24)	304 (25)	316 (30)	332 (29)	339 (31)	357 (34)	371 (34)
Bestellfrequenz von Nutzer A (Bestellungen / Stunde)	8	9	10	11	12	13	14
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer A	56 (8)	64 (7)	70 (7)	78 (9)	83 (9)	91 (10)	98 (9)
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer B	69 (8)	72 (9)	71 (7)	71 (7)	69 (8)	70 (8)	71 (9)
Mittlere Durchlaufzeit der	388	417	426	450	469	495	524

Bestellungen für Nutzer A	(41)	(47)	(43)	(46)	(51)	(57)	(82)
Mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen für Nutzer B	385 (38)	414 (44)	430 (40)	454 (43)	467 (54)	498 (65)	520 (80)
Bestellfrequenz von Nutzer A (Bestellungen / Stunde)	15	16	17	18	19	20	
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer A	106 (11)	113 (11)	118 (10)	128 (10)	134 (12)	141 (13)	
Mittlere Anzahl Bestellungen von Nutzer B	71 (8)	70 (9)	70 (8)	70 (9)	69 (8)	71 (9)	
Mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen für Nutzer A	559 (90)	593 (105)	618 (92)	695 (148)	755 (167)	853 (269)	
Mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen für Nutzer B	560 (100)	594 (108)	621 (104)	693 (158)	759 (178)	852 (288)	

Bei einer Bestellfrequenz von einer Bestellung pro Stunde von Nutzer A erreicht die mittlere Durchlaufzeit je Bestellung 294 s für Nutzer A und 289 s für Nutzer B. Im Falle einer Bestellfrequenz von 20 Bestellungen pro Stunde für Nutzer A nimmt die mittlere Durchlaufzeit Werte von 853 s (Nutzer A) bzw. 852 s (Nutzer B) an. Obwohl die Bestellfrequenz von Nutzer B in jedem Simulationsdurchlauf konstant bei 10 Bestellungen pro Stunde liegt, nehmen die mittleren Durchlaufzeiten stets ähnliche Werte für beide Nutzer an. Das bedeutet, dass die mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen von Nutzer B mit einer steigenden Bestellfrequenz von Nutzer A ansteigt. Für niedrige Bestellfrequenzen von Nutzer A steigt die mittlere Durchlaufzeit langsamer an als für höhere Bestellfrequenzen. Dies wird ebenfalls durch die FIFO-Regel verursacht, mit der die Bestellungen dem Kommissionierer zugeordnet werden: Bei höheren Bestellfrequenzen ist die Wahrscheinlichkeit höher, dass eine Bestellung warten muss, bis sie kommissioniert wird und es ist unwahrscheinlicher, dass der Kommissionierer direkt nach Eingang der Bestellung damit beginnen kann, die zugehörigen Artikel zu entnehmen.

Eine weitere Analyse beschäftigt sich mit dem Einfluss des Zeitpunktes, zu dem Bestellungen aufgegeben werden. Dazu wird die Bestellfrequenz von Nutzer A nicht länger als konstanter Wert angenommen, sondern wird über die Laufzeit des Modells variiert, wobei zuvor definierte Nachfrageverläufe zugrunde gelegt werden. Diese Nachfrageverläufe sind so gestaltet, dass jeweils eine Spitzennachfrage um 12:00 Uhr stattfindet, die unterschiedlich mit Bestellfrequenzen zwischen 30 und 60 Bestellungen pro Stunde unterschiedlich stark

ausgeprägt ist. Die durchschnittliche Bestellfrequenz über den gesamten Tag betrachtet beträgt jedoch in jedem Nachfrageverlauf stets ungefähr 13 Bestellungen pro Stunde für Nutzer A. Zusätzlich wird ein konstanter Nachfrageverlauf mit 13 Bestellungen pro Stunde simuliert, um die flexiblen Nachfrageverläufe mit den Szenario einer konstanten Nachfrage aus den vorherigen Analysen vergleichen zu können. Die Nachfrageverläufe von Nutzer A sind in Abbildung 6a dargestellt. Die Nachfrage von Nutzer B liegt – wie zuvor – konstant bei 10 Bestellungen pro Stunde und ändert sich auch nicht über die Zeit. Jeder Nachfrageverlauf wurde insgesamt 100-mal simuliert, wobei abermals die mittlere Durchlaufzeit je Bestellung berechnet wurde. In Abbildung 6b sind die durchschnittlichen Durchlaufzeiten jeder Bestellung von Nutzer B für jedes 30-Minuten-Intervall zwischen 8:30 Uhr und 16:00 Uhr aufgetragen. Zusätzlich finden sich in die exakten Werte zusammen mit dem Standardfehler in Tabelle 4.

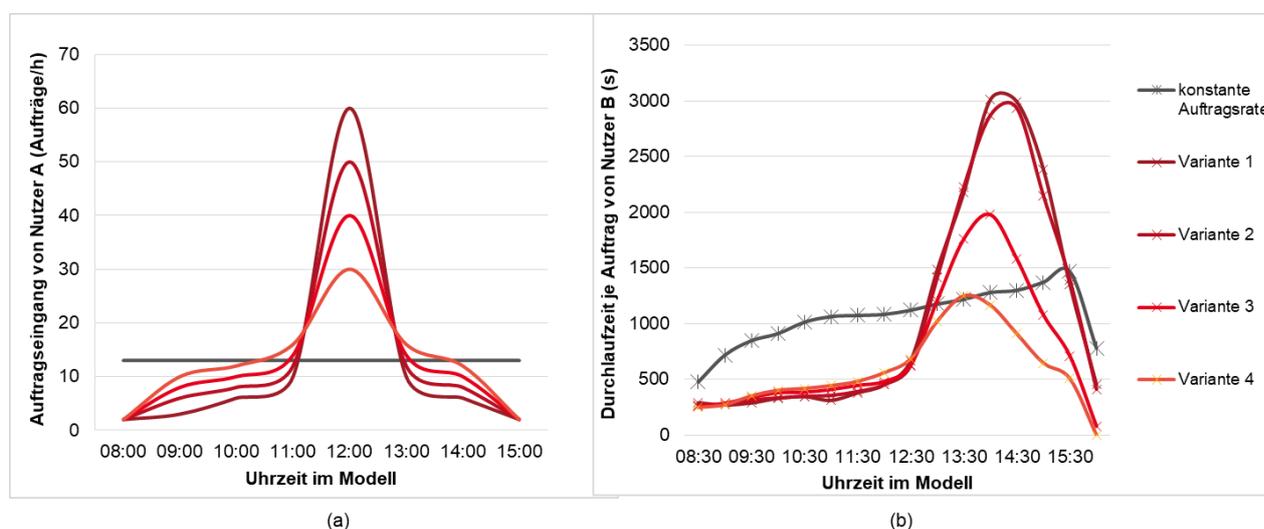


Abbildung 6: Simulierte Nachfrageverläufe von Nutzer A (a) und Auswirkungen auf die Durchlaufzeiten der Bestellungen von Nutzer B (b).

Tabelle 4: Mittlere Durchlaufzeiten der Bestellungen von Nutzer B (in Sekunden) aus 100 Simulationsläufen für verschiedene Nachfrageverläufe (Schedules) von Nutzer A und einer konstanten Nachfrage von 10 Bestellungen pro Stunde für Nutzer B (Standardfehler in Klammern).

Bestellfrequenz von User A	08:30	09:00	09:30	10:00	10:30	11:00	11:30	12:00
Konstant (13 Bestellungen / Stunde)	477 (144)	717 (221)	847 (300)	910 (330)	1013 (417)	1063 (475)	1073 (522)	1083 (537)
Schedule 1	290 (0)	270 (0)	288 (0)	329 (144)	345 (0)	311 (169)	379 (0)	451 (105)
Schedule 2	264	276	314	334	348	356	391	452

	(0)	(0)	(23)	(174)	(166)	(135)	(103)	(111)
Schedule 3	261 (0)	286 (0)	337 (1)	380 (99)	385 (65)	409 (212)	446 (96)	481 (108)
Schedule 4	248 (0)	272 (148)	352 (147)	402 (149)	419 (96)	444 (133)	482 (108)	560 (176)
Bestellfrequenz von User A	12:30	13:00	13:30	14:00	14:30	15:00	15:30	16:00
Konstant (13 Bestellungen / Stunde)	1120 (549)	1175 (572)	1218 (692)	1279 (759)	1299 (704)	1371 (730)	1466 (813)	779 (1223)
Schedule 1	666 (221)	1482 (299)	2175 (192)	3010 (262)	2992 (234)	2385 (138)	1350 (234)	454 (1023)
Schedule 2	623 (217)	1412 (305)	2227 (382)	2870 (263)	2933 (219)	2150 (349)	1393 (70)	41 (0)
Schedule 3	627 (206)	1208 (214)	1759 (197)	1978 (580)	1580 (169)	1079 (103)	710 (0)	79 (0)
Schedule 4	683 (95)	1022 (212)	1250 (174)	1166 (148)	909 (333)	647 (371)	506 (113)	0 (0)

Für den Fall einer konstanten Bestellfrequenz von 13 Bestellungen pro Stunde für Nutzer A liegt die mittlere Durchlaufzeit der Bestellungen von Nutzer B zwischen 477 und 1466 s. Wie man in Abbildung 6 erkennen kann, stellt sich auch bei konstanter Nachfrage eine Spitze bei den Durchlaufzeiten von Nutzer B gegen 15:30 Uhr ein. Diese längeren Durchlaufzeiten werden durch frühere Bestellungen verursacht, die auf Grund der begrenzten Kapazität des Kommissionierers noch auf ihre Kommissionierung warten. Für den Nachfrageverlauf in Schedule 1, mit einer Spitzennachfrage von 60 Bestellungen pro Stunde von Nutzer A, erreichen die mittleren Durchlaufzeiten der Bestellungen von Nutzer B sogar einen Maximalwert von 3010 s, also mehr als doppelt so viel wie bei konstanter Nachfrage von Nutzer A. Interessanterweise wird die maximale mittlere Durchlaufzeit von Nutzer B bei Schedule 1 im Zeitintervall zwischen 13:30 und 14:00 Uhr erreicht, also fast zwei Stunden nachdem die Nachfragekurve ihren Spitzenwert erreicht hat. Im Falle von Schedule 2 mit einer maximalen Nachfrage von 50 Bestellungen pro Stunde von Nutzer A, erreichen die mittleren Durchlaufzeiten der Bestellungen von Nutzer B einen Maximalwert von 2933 s im Zeitintervall zwischen 14:00 und 14:30 Uhr. Für Schedule 4 mit einer Spitzennachfrage von 30 Bestellungen

pro Stunde wird die maximale mittlere Durchlaufzeit für Bestellungen von Nutzer B zwischen 13:00 und 13:30 Uhr erreicht, mit einem Wert von 1250 s. Dieser Wert ist sogar geringer als der maximale Wert bei konstanter Nachfrage von Nutzer A.

In diesem Arbeitspaket wurde das Simulationsmodell also genutzt und erweitert, um den Einfluss unterschiedlichen Nachfrageverhaltens eines Nutzers im Lagers auf die Durchlaufzeiten des anderen Nutzers zu untersuchen. Wie zu erwarten ist, steigen die Durchlaufzeiten mit steigender Nachfrage von Nutzer A. Dies liegt in der gestiegenen Nutzung der gemeinsamen Ressource Kommissionierer begründet, dessen Arbeitszeit mit einer erhöhten Bestellfrequenz eines Nutzers steigt. Außerdem zeigen die Ergebnisse, dass für die gewählten Parameter Nachfragespitzen eines Nutzers die Durchlaufzeiten des anderen Nutzers mit einer Zeitverzögerung von bis zu zwei Stunden beeinflussen. Die Ergebnisse zeigen also eindeutig auf, dass das Nachfrageverhalten eines Nutzers die Durchlaufzeiten des anderen Nutzers signifikant beeinflussen kann, wenn gemeinsam genutzte Ressourcen nur begrenzt vorhanden sind. Dies unterstreicht die Bedeutung von Methoden, welche das Nachfrageverhalten einzelner Nutzer in kooperativen Lagern steuern und ein koordiniertes Vorgehen der Partner fördert und die bei der Planung und dem Betrieb kooperativer Lager zum Einsatz kommen sollten. Dies kann entweder durch eine Begrenzung der Ressourcen-Nutzung für die Nutzer geschehen indem allgemeingültige Regeln aufgestellt werden oder indem die Ressourcennutzung – in diesem Fall die Auslastung des Kommissionierers – in ein Preismodell für den kooperativen Betrieb eines Lagers integriert wird. Dies soll im folgenden Arbeitspaket konkret umgesetzt werden.

2.3.2 Verhaltensbezogene Aspekte in der urbanen Distribution

Im Rahmen der urbanen Distribution wurden die Auswirkungen von akteursspezifischen und akteursübergreifenden Einflussfaktoren auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Kooperationen in der urbanen Distribution gelegt. Konkret wurde dabei der Frage nachgegangen, unter welchen operativen und gesetzlichen Bedingungen urbane Konsolidierungsansätze sinnvollerweise in urbane Lieferketten integriert werden könnten. In diesem Kontext wurden gemeinsam mit den Praxispartnern zunächst die verschiedenen Anwendungsfälle und Barrieren zur Nutzung von kooperativen Logistikkonzepten diskutiert. Da urbane Distributionsprozesse aufgrund unterschiedlicher Sendungsgrößen, Distributionsstrukturen und Kundenanforderungen sehr heterogen sind, muss das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Kooperationen ebenso differenziert untersucht werden. Infolge dessen wurden zwei Fallstudien zur Untersuchung der Einflussfaktoren definiert und anhand des entwickelten Simulationsmodells untersucht.

Fallstudie 1:

Im Rahmen der ersten Fallstudie wurden die Einflussfaktoren auf die Nutzung eines kooperativen UCCs für palettierte Sendungen zur Belieferung des städtischen Handels untersucht. Hierbei lag insbesondere das Augenmerk auf den Auswirkungen von verkehrsbeschränkenden Maßnahmen auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis der Kooperationen.

Für die Untersuchung wurden die Stadt Frankfurt am Main und das umliegende Rhein-Main-Gebiet betrachtet. Mangels eines realen UCC in Frankfurt wurde ein fiktives UCC, welches auf Kostenfaktoren und Daten aus der Literatur basiert und am Stadtrand liegt, modelliert. Um ein Netzwerk von Warenempfängern zu generieren, wurden reale Einzelhändlerstandorte der Frankfurter Innenstadt aus der OpenStreetMap extrahiert und zufällig für die Fallstudie ausgewählt (siehe Abbildung 7). Zur Modellierung von Warenempfängern außerhalb des Stadtgebiets, welche nicht durch ein UCC beliefert werden können, wurden zudem 20 Warenempfänger in jeweils unterschiedlichen Gemeinden des Rhein-Main-Gebiets ausgewählt und als Agenten modelliert. Bezüglich der Logistikdienstleister-Agenten wurde ebenfalls auf reale Unternehmensstandorte aus dem Rhein-Main-Gebiet zurückgegriffen.

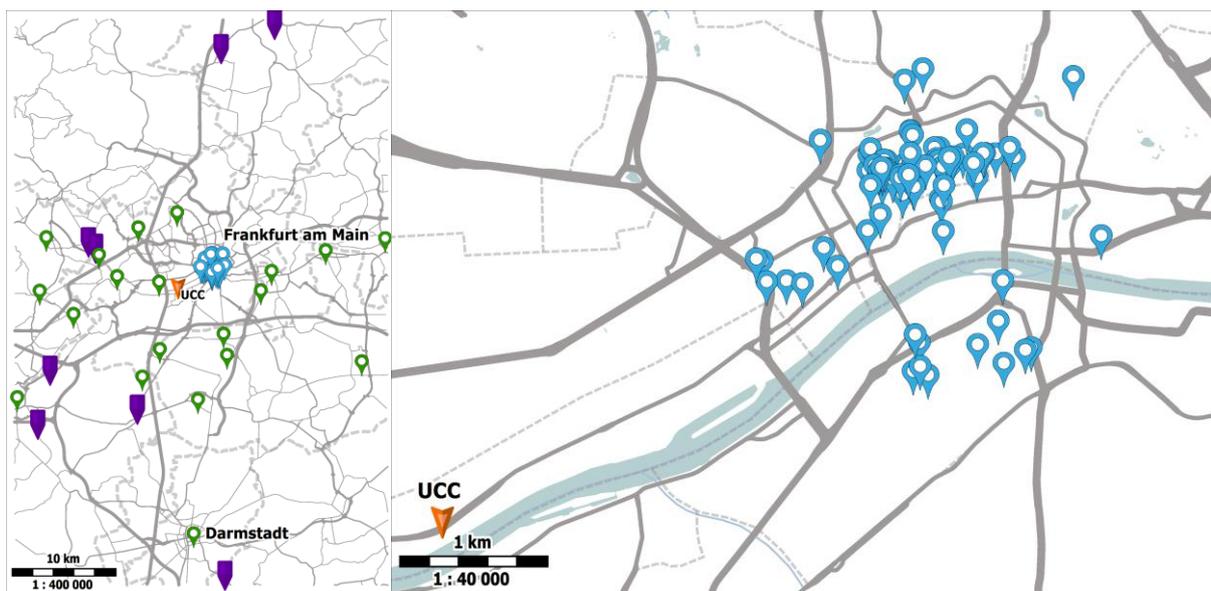


Abbildung 7: Ansicht des Rhein-Main-Gebietes und der Frankfurter Innenstadt mit dem UCC-Standort (orangefarbener Pfeil), Logistikdienstleisterstandorten (lila Pfeil), städtischen Warenempfänger (blaue Pins) und nicht städtischen Warenempfängern (grüne Pins). (Kartendaten sind urheberrechtlich geschützt – © OpenStreetMap contributors).

Bezüglich des Nachfrageverhaltens der Warenempfänger wurden drei unterschiedliche Nachfrageprofile definiert, welche den Warenempfängern je Simulationsdurchlauf zufällig zugewiesen werden. Die Warenempfänger werden dabei zwischen 1 bis 4-mal je Woche beliefert und haben 1 bis 6 Logistikdienstleister. Die Logistikdienstleister sowie der UCC-

Betreiber haben zwei Fahrzeugtypen, welche sie für die Touren nutzen können. Diese unterscheiden sich in der Ladekapazität und den zeit- und distanzabhängigen Kosten (siehe Tabelle 5).

Tabelle 5: Modellierte Fahrzeugtypen und deren Eigenschaften (Fallstudie 1).

Fahrzeugeigenschaft	Lkw (7,49t)	Sattelzug (39t)
Distanzabhängige Kosten [€/km]	0,31	0,41
Zeitabhängige Kosten [€/h]	30,85	32,01
Volumenkapazität [pal]	14	34
Nutzlast [kg]	3 150	25 000

Des Weiteren wurden auf Basis der Literatur Handlingkosten von 4€/Palette für das UCC angenommen. Für die Aufteilung der monatlichen Kosten des UCCs je Logistikdienstleister wurde eine proportionale Kostenaufteilung gewählt, welche auf der Anzahl der an das UCC übergebenen Aufträge basiert. Bei der Definition der zu untersuchenden Szenarien wurden zunächst verkehrsbeschränkende Maßnahmen in europäischen Städten und deren Ausprägungen recherchiert. Dabei wurde der Schwerpunkt auf folgende Restriktionen gelegt:

- Lieferzeitfenster
- Zonenbasierte City-Maut
- Zufahrtsbeschränkungen

Lieferzeitfenster in Fußgängerzonen sind eine häufig vorzufindende Maßnahme in europäischen Städten. Beispielsweise können Teile der Fußgängerzone in Frankfurt am Main nur zwischen 5:00 und 11:00 Uhr durch den Lieferverkehr befahren werden. In den meisten wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden jedoch restriktivere Zeitfenster betrachtet (siehe z. B. Van Heeswijk et al. 2019). Das Konzept der zonenbasierten City-Maut existiert derzeit noch nicht in deutschen Großstädten, ist aber bereits in einigen europäischen Städten implementiert. So haben beispielsweise die schwedischen Städte Göteborg und Stockholm Zugangsgebühren von bis zu 60 und 105 SEK (ca. 5,95€ und 10,40€) pro Fahrzeug und Tag eingeführt. Auch die italienische Stadt Mailand verlangt 5€ pro Fahrzeug und Tag, und die norwegische Hauptstadt Oslo hat eine Mautgebühr von bis zu 193 NOK (ca. 20,34€) für Fahrzeuge über 3,5t während der Hauptverkehrszeiten eingeführt. Die dritte Restriktion, die Lkw oder bestimmte Arten von Fahrzeugen die Zufahrt ins Innenstadtgebiet verbietet, findet sich in der Praxis häufig in Form von Gewichts-, Maß- oder Emissionsbeschränkungen. So gibt

es beispielsweise in der ungarischen Hauptstadt Budapest verschiedene Verkehrszonen, die den Zugang für Fahrzeuge über 3,5t, 7,5t oder 12t beschränken.

Basierend auf den drei Restriktionen wurden in der Simulation neun Szenarien untersucht, welche die Restriktionen kombinieren (siehe Tabelle 6). Jedes Szenario wurde jeweils für die kooperative und nicht-kooperative Distribution für einen Zeitraum von einem Monat simuliert.

Tabelle 6: Untersuchte Szenarien im Rahmen der ersten Fallstudie.

Variable	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
Lieferzeitfenster	–	8:00-11:00	–	–	8:00-11:00	8:00-11:00	–	8:00-11:00	8:00-9:30
Zonenbasierte City-Maut	–	–	10€/Tag	–	10€/Tag	–	10€/Tag	10€/Tag	–
Zufahrtsbeschränkungen	–	–	–	<7.5t	–	<7.5t	<7.5t	<7.5t	<7.5t

Die Ergebnisse der Fallstudie zeigen, dass die Verkehrsbeschränkungen aus globaler Verkehrs- und Umweltsicht bei nicht-kooperativer Distribution zu negativen Auswirkungen führen, da durch die Verkehrsbeschränkungen mehr Fahrzeuge benötigt werden (siehe Abbildung 8). Die Nutzung eines UCC kann jedoch die Anzahl der in die Stadt fahrenden Fahrzeuge deutlich reduzieren und damit die Umweltbelastung senken.

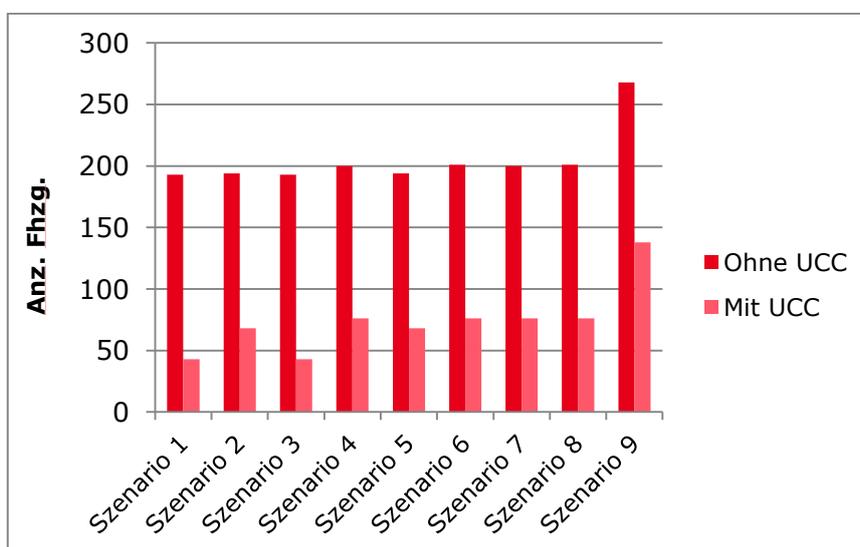


Abbildung 8: Analyse der Anzahl der in das Stadtgebiet einfahrenden Fahrzeuge je Szenario. Unterschieden nach Durchläufen mit Nutzung des UCCs und ohne Nutzung des UCCs.

Aus Kostensicht zeigt sich jedoch, dass das UCC ohne städtische Zugangsbeschränkungen zu erheblichen Mehrkosten führt (siehe S1 in Abbildung 9). Die Analyse der Ergebnisse zeigt

jedoch, dass der Nutzen eines kooperativen UCCs je Transportunternehmen abhängig von der geografischen Lage und Auftragsstruktur schwankt. Zudem lässt sich ableiten, dass eine City-Maut nur einen geringen Beitrag zur Kostenattraktivität eines UCCs leistet. Zufahrtsbeschränkungen haben hingegen einen hohen Einfluss auf die Anzahl der eingesetzten Fahrzeuge. Sie können daher insbesondere in Kombination mit anderen Maßnahmen zu einer höheren Kostenattraktivität des UCC und somit der Kooperation führen.

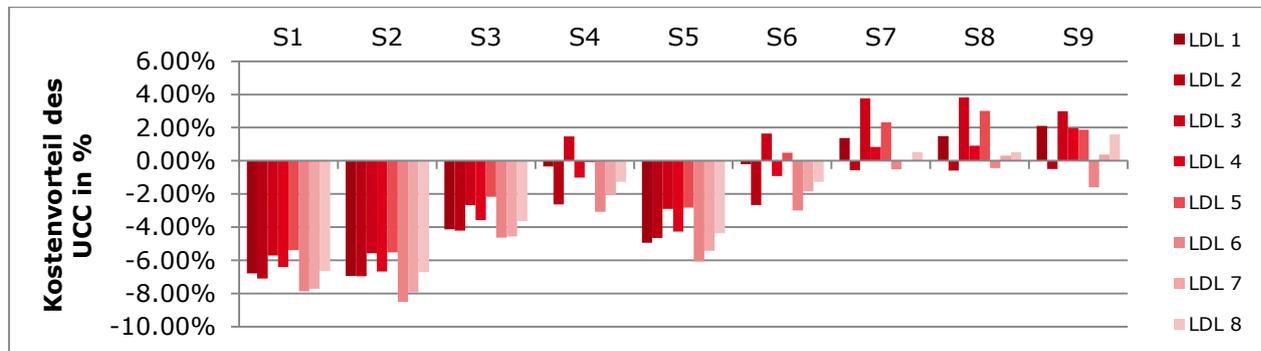


Abbildung 9: Vergleich der Kosten der kooperativen und nicht-kooperativen Distribution je Logistkdienstleister (LDL) und Szenario.

Fallstudie 2:

Um auch diese Potenziale für den KEP-Markt zu untersuchen, wurde in einer zweiten Fallstudie das Kosten-Nutzen-Verhältnis von kooperativ betriebenen Distributionskonzepten untersucht. Hierbei wurde das konzeptionell Modell der kooperativen Distribution um eine weitere Distributionsstufe erweitert, sodass sowohl drei- als auch zweistufige Distributionskonzepte untersucht werden können. Die dritte Distributionsstufe stellt dabei sogenannte Mikro-Depots bzw. Micro-Consolidation Center (MCC) dar, von denen aus die Sendungen per Lastenrad zu den Warenempfängern transportiert werden können. Im Gegensatz zu klassischen UCCs befinden sich diese Depots innerhalb eines Stadtzentrums, um die Lieferzeiten zu verkürzen. Mikro-Depots beschreiben in diesem Kontext Umschlagspunkte, die nur von einem Nutzer verwendet werden, wohingegen MCCs kooperative Umschlagspunkte zur unternehmensübergreifenden Konsolidierung darstellen.

Für die zweite Fallstudie wurde ebenfalls Frankfurt am Main als Untersuchungsregion betrachtet. Hierbei wurde der Fokus auf B2B-Paketsendungen gelegt, welche laut Schäfer et al. (2017) rund 91% der KEP-Sendungen in der Frankfurter Innenstadt ausmachen. Für die Generierung der Warenempfänger und deren Standorte, wurden reale Unternehmensstandorte aus drei Postleitzahlgebieten der Frankfurter Innenstadt aus der OpenStreetMap extrahiert und davon 400 Standorte zufällig für die Fallstudie ausgewählt (siehe Abbildung 10). Als Standorte für die Logistkdienstleister haben wir bestehende Umschlagdepots von 4 KEP-Dienstleistern in

der Nähe von Frankfurt ausgewählt. Im Hinblick auf die Standorte der MCCs haben wir zunächst den realen Standort eines MCCs implementiert. Dieses MCC befindet sich neben einem Parkhaus in der Innenstadt und wird derzeit von einem einzigen Logistikdienstleister betrieben. Als zweiten MCC-Standort haben wir eine öffentliche Fläche in der Nähe des Hauptbahnhofs ausgewählt. Dies ist dadurch gerechtfertigt, dass es an innerstädtischen Logistikflächen mangelt, was die öffentliche Verwaltung dazu bringen könnte, Flächen anzubieten (siehe z. B. Rudolph und Gruber 2017). Was die UCCs am Stadtrand betrifft, wurden in der zweiten Fallstudie zwei fiktive UCCs modelliert. Hierfür wurden zwei Industriestandorte im Westen und Osten Frankfurts ausgewählt. Eine Übersicht über das gesamte Netzwerk ist in Abbildung 10 dargestellt.

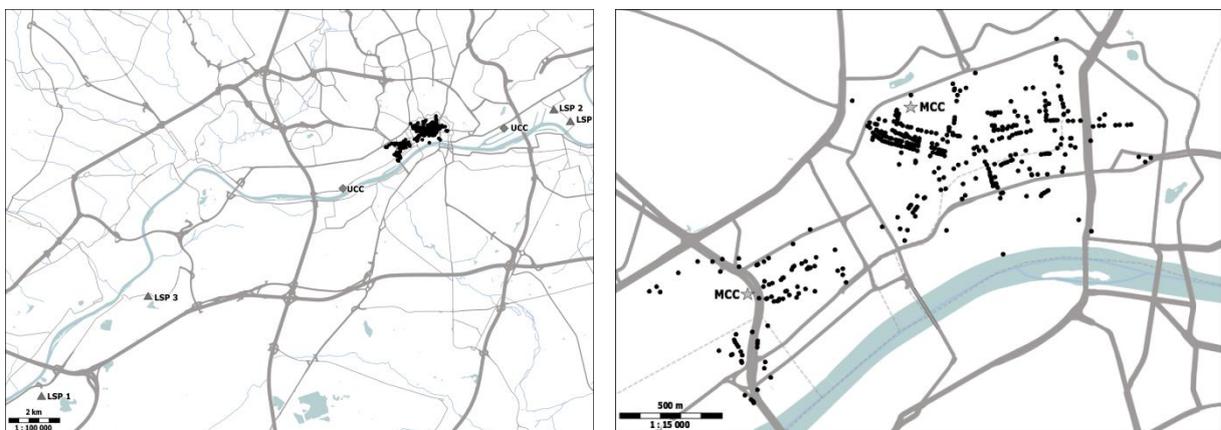


Abbildung 10: Überblick über das betrachtete Netzwerk (links) und die Frankfurter Innenstadt (rechts) mit den Standorten der Warenempfänger (schwarze Punkte), UCC-Standorte (graue Karos), MCC-Standorte (graue Sterne) und Logistikdienstleisterstandorte (graue Dreiecke) (Kartendaten sind urheberrechtlich geschützt – © OpenStreetMap contributors).

Bezüglich des Nachfrageverhaltens der Warenempfänger wurden vordergründig auf Studien und Statistiken zu Paketnachfrage von B2B-Kunden und Einzelhändlern zurückgegriffen. Basierend auf der Erhebung von Schäfer et al. (2017) nehmen wir durchschnittlich 2,2 Pakete je Lieferung und Warenempfänger an. Darüber hinaus gehen wir auf der Grundlage einer von Bogdanski (2012) in Nürnberg durchgeführten Umfrage, die ergab, dass B2B-Kunden durchschnittlich 5,4 Paketzustellungen pro Woche erhalten, davon aus, dass die Anzahl der Zustellungen pro Woche und Warenempfänger einer Dreiecksverteilung mit einem Durchschnittswert von 5,4 folgen. Bezüglich der Eigenschaften der einzelnen Sendungen nehmen wir basierend auf der Literatur und Erhebungen des Bundesverband Paket und Expresslogistik e. V. ein durchschnittliches Gewicht von 7,4 kg und ein durchschnittliches Volumen von 0.063 m³ an (vgl. KE-CONSULT Kurte & Esser GbR 2018).

Ähnlich zur ersten Fallstudie können die Logistikdienstleister und UCC-Betreiber in der zweiten Fallstudie zwei unterschiedliche Fahrzeuge einsetzen. Das MCC nutzt hingegen elektrische Lastenfahrräder für die Distribution der Paketsendungen. Die Eigenschaften der drei modellierten Fahrzeuge, welche in Tabelle 7 zusammengefasst sind, basieren hierbei auf eigenen Berechnungen basierend auf ETM (2015) und den Angaben des Herstellers des beispielsweise durch DHL, Hermes und DB Schenker genutzten Lastenrads „Velove Armadillo“.

Tabelle 7: Modellierte Fahrzeugtypen und deren Eigenschaften (Fallstudie 2).

Fahrzeugeigenschaft	Lkw (7.49t)	Van (3.5t)	E-Lastenfahrrad
Distanzabhängige Kosten [€/km]	0.34	0.25	0.043
Zeitabhängige Kosten [€/h]	25	20	15
Feste Kosten pro Nutzungstag [€/Tag]	55.35	35.17	9.02
Volumenkapazität [m ³]	28	12	1
Nutzlast [kg]	3 400	1 350	125
Routing	Auto	Auto	Lastenfahrrad

Da sowohl UCCs und MCCs zusammen als auch getrennt genutzt werden könnten, werden in der Simulation der zweiten Fallstudie unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten betrachtet. Hierfür wurden vier Grundszenarien definiert, welche sich bezüglich der Nutzung der UCCs und MCCs unterscheiden (siehe Tabelle 8). Darüber hinaus wurden Varianten mit einem Lieferzeitfenster mit einer Länge von 3 Stunden simuliert. Für jedes Szenario wurden 20 Simulationsdurchläufe durchgeführt und jeder Simulationsdurchlauf spiegelt einen Zeitraum von 7 Tagen wider.

Tabelle 8: Untersuchte Szenarien im Rahmen der zweiten Fallstudie.

Option	S1 a	S1 b	S2 a	S2 b	S3	S4
LDL nutzen UCCs			●	●	●	
LDL nutzen MCCs					●	●
Lieferzeitfenster (3h)		●		●		

Anhand der Simulationsergebnisse der zweiten Fallstudie in Abbildung 11 lässt sich erkennen, dass klassische UCCs aufgrund der bereits sehr nahe am Stadtrand gelegenen KEP-Dienstleister-Depots und zusätzlichen Umschlags- und Fixkosten keine Kostenvorteile in der

Fallstudie bieten. Andererseits erweist sich die Nutzung von MCCs in Verbindung mit Lastenfahrrädern als wirtschaftlich sinnvoll für die Kooperationspartner in der Fallstudie. Die Analyse der Fahrzeugnutzung zeigt zudem, dass Szenarien mit Lastenfahrrädern dazu beitragen können, den motorisierten Verkehr zu reduzieren (ca. 28% Reduzierung der motorisierten Kilometer im Stadtgebiet).

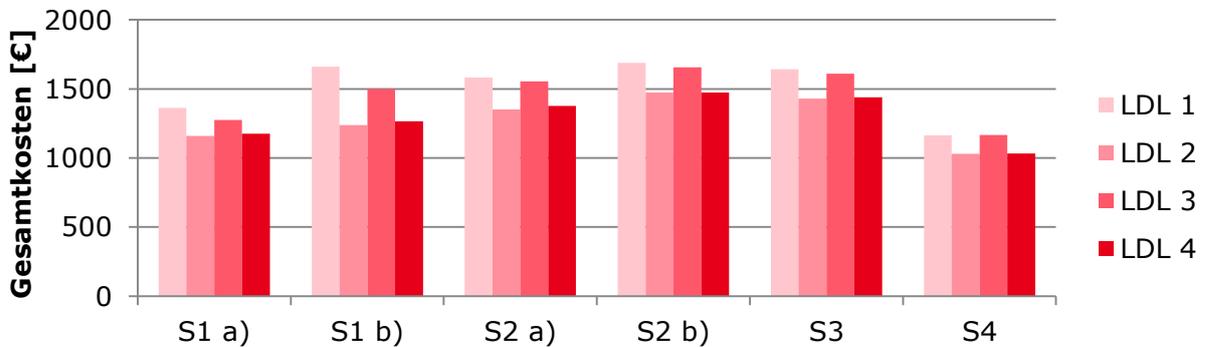


Abbildung 11: Analyse der Gesamtkosten je Logistikkostenleister (LDL) und Szenario.

Zusammenfassend kann aus den beiden Fallstudien abgeleitet werden, dass kooperative Distributionskonzepte erhebliche Potenziale zur Reduzierung des motorisierten Verkehrs und somit der Emissionen in Städten bieten könnten. Der individuelle Nutzen je Logistikkostenleister hängt jedoch neben den gesetzlichen Rahmenbedingungen stark von der Lage der Standorte als auch von der eingesetzten Flotte und dem Nachfrageverhalten der Warenempfänger ab. Vor allem Verkehrsrestriktionen erhöhen das Kosten-Nutzen-Verhältnis von UCCs und MCCs und können somit zur Vorteilhaftigkeit, welche eine Grundvoraussetzung für Kooperationen ist, beitragen.

2.4 Arbeitspaket 4 – Identifikation eines Preismodells

Zielsetzung und Ausgangslage: Das Ziel dieses Arbeitspakets besteht in der Entwicklung eines eigenen Preismodells, das dazu geeignet ist, Nachfrageschwankungen in der manuellen Kommissionierung zu berücksichtigen und ein kooperatives und koordiniertes Verhalten der Partner zu fördern. Dadurch soll eine Alternative zu den häufig verwendeten proportionalen Modellen der Kostenaufteilung geschaffen werden, um die Kooperationen mehrerer Akteure in UCCs und Multi-User Warehouses attraktiver zu gestalten.

Zwei zentrale Voraussetzungen für generelle Kostenaufteilungsmodelle in Kooperationen werden von Amigo et al. (2016) formuliert. Die Autoren der Studie stellen fest, dass Kostenaufteilungsmodelle von allen Partnern als fair betrachtet werden müssen, damit sie in der Praxis funktionieren. Außerdem sollte ein Modell Anreize für die Kooperationspartner schaffen, in der Kooperation zu verbleiben und aktiv den Erfolg der Kooperation zu fördern. Für den

Anwendungsbereich des kooperativen Transportes formulieren Vonovermeire et al. (2014) eine dritte wichtige Anforderung: Nach ihren Erkenntnissen sollte ein Kostenaufteilungsmodell eine gewisse Flexibilität der Kooperationspartner fördern und ermöglichen, um Möglichkeiten zur Gesamtkostenreduktion der Kooperation zu schaffen.

Eine einfach zu implementierende und daher häufig in der Praxis eingesetzte Methode zur Aufteilung von Kosten und Erträgen zwischen Partnern besteht in der proportionalen Aufteilung basierend auf einem ausgewählten Parameter wie beispielsweise dem Transportvolumen jedes Partners (Hariga 2011, Frisk et al. 2010). Allerdings wird eine solche proportionale Aufteilung häufig nicht von allen Partnern als fair betrachtet und vernachlässigt somit eine der zentralen Voraussetzungen für ein tragfähiges Modell (Crujissen et al. 2007, D'Amours/Rönnqvist 2010). Aus diesem Grund argumentieren Lozano et al. (2013), dass es sich bei der so genannten *cooperative game theory* um einen vielversprechenderen Ansatz zur Aufteilung von Kosten und Erträgen handelt. Die Autoren entwickeln ein lineares Modell, welches in der Lage ist, Kosteneinsparungspotentiale von Transportunternehmen in Kooperationen in unterschiedlichen Szenarien zu analysieren. Eine weitere Forschungsarbeit, welche die *cooperative game theory* für den Einsatz in horizontalen Kooperationen zwischen Transportunternehmen vorschlägt, findet sich in Krajewska et al. (2008). Ein genereller Vergleich verschiedener Kostenaufteilungsmodelle auf Basis von *cooperative game theory* für den Einsatz in Logistiknetzwerken findet sich in Özener/Ergun (2008). In der Arbeit simulieren die Autoren ein Netzwerk, in dem Versender Kooperationen mit dem Ziel eingehen, bessere Raten mit Spediteuren auszuhandeln. Eine generelle Übersicht über unterschiedliche Kostenaufteilungsmodelle, sowohl klassische als auch solche, die *cooperative game theory* verwenden, findet sich bei Frisk et al. (2010).

Eine Methode zur Aufteilung von Kosten und Erträgen, die häufig in der wissenschaftlichen Literatur zu finden ist und auf *cooperative game theory* basiert, ist der so genannte *Shapely value* (siehe z.B. Krajewska et al. 2008, Liu et al. 2010, Lozano et al. 2013, Sherali/Lunday 2011). Die zugrunde liegende Idee des *Shapely value* sieht vor, die individuelle Stärke jedes Partners bei der Aufteilung von Kosten zu berücksichtigen, da der individuelle Beitrag eines jeden Partners zur Kooperation unterschiedlich stark ausfallen kann. Zu diesem Zweck berechnet der *Shapely value* die marginalen Kosten jedes Partners in jeder Möglichen Verbindung mit der Gesamtkooperation (Shapely 1953).

Um dem Problem zu begegnen, dass zahlreiche der in der Literatur existierenden Kostenaufteilungsmodelle in der Praxis wenig Anerkennung finden und kaum von Unternehmen akzeptiert werden, schlagen Frisk et al. (2010) die *Equal-Profit-Methode* vor. Diese soll sicherstellen, dass alle Partner in einer Kooperation einen gleichen relativen Ertrag erzielen in

Abhängigkeit von ihren Kosten. Die Autoren argumentieren, dass eine gleiche Ausgangssituation aller Partner wichtig ist, um bei der Ausgestaltung der Kooperation langfristig stabile Voraussetzungen zu schaffen.

Allerdings sind die oben genannten Modelle und Methoden nicht dazu geeignet, den Einfluss unterschiedlichen Nachfrageverhaltens von Partnern innerhalb einer Kooperation und dem Zusammenwirken von Ressourcennutzung und beispielsweise Durchlaufzeiten in Lagerhäusern zu berücksichtigen. Ein Kostenaufteilungsmodell, das explizit die Nutzung von Ressourcennutzung durch die Partner in einer Kooperation berücksichtigt, ist das sogenannte *activity-based costing*. Bei diesem Verfahren müssen zunächst alle Aktivitäten und Kostentreiber innerhalb der Kooperation identifiziert werden. Die entstehenden Kosten werden anschließend gemäß der Ressourcennutzung durch die Partner für jede dieser Aktivitäten aufgeteilt. Jedoch zeigt sich, dass insbesondere die Identifikation der Aktivitäten und zugehörigen Kosten häufig schwierig und zeitaufwendig ist (Vanovermeire/Sörensen 2014). Außerdem ist ein Kostenaufteilungsmodell basierend auf der summierten Ressourcennutzung durch jeden Partner nicht dazu geeignet, Schwankungen in der Ressourcennachfrage zu berücksichtigen. Solche Modelle sind daher nur begrenzt dazu geeignet, ein kooperatives Verhalten, das zu einer gleichmäßigen Ressourcennutzung führt, zu fördern. Daher wurde der Bedarf erkannt, ein neues Preismodell zu entwickeln, das explizit auf der Nutzung gemeinsamer Ressourcen durch die Partner einer Logistik-Kooperation basiert und dabei auch eine volatile Nachfrage berücksichtigen kann.

Vorgehen: Die Beschreibung des Vorgehens im vierten Arbeitspaket erfolgt ebenfalls getrennt für die Bereiche kooperative Lagerhaltung und kooperative urbane Distribution. Im Bereich der kooperativen Lagerhaltung wurde ein Preismodell für die kooperative Kommissionierung im Lager entwickelt. Im Bereich der urbanen Distribution wurden unterschiedliche Preismodelle aus der Literatur miteinander verglichen.

2.4.1 Preismodell für die kooperative Kommissionierung im Lager

2.4.1.1 Beschreibung des Preismodells

Vor der eigentlichen Entwicklung des Preismodells wurden die zentralen Anforderungen an das Modell auf Basis der vorangegangenen Untersuchungen formuliert. Ein zentrales Ziel ist dabei, vor allem die praktische Anwendbarkeit des Modells sicherzustellen. Die identifizierten Anforderungen lauten:

- 1) Das Modell soll auf der tatsächlichen Ressourcennutzung in der manuellen Kommissionierung basieren, also einen Preis p_i pro Pick i auf Basis der Anzahl an Picks in einem bestimmten Zeitraum berechnen.

- 2) Die Summe der Preise, die auf Basis des Preismodells für die Kommissionierung von den Nutzern gezahlt werden, muss mindestens den Kosten der Kommissionierung entsprechen, um die wirtschaftliche Nachhaltigkeit des kooperativen Lagers zu sichern.
- 3) Das Preismodell soll ausschließlich verfügbare Daten als Eingabeparameter akzeptieren, d.h. ohne in ihrer Höhe unsichere Werte bzw. Vorhersagedaten auskommen. Im hier vorliegenden Fall werden ausschließlich die Anzahl an bisher kommissionierten Artikeln je Partner sowie die Gesamtkosten des Lagers in einem bestimmten Zeitraum als Eingangsgrößen benötigt.
- 4) Im Unterschied zu bestehenden Preismodellen soll das Modell insbesondere Unterschiede im Nachfrageverhalten in der manuellen Kommissionierung berücksichtigen können, um eine gleichmäßige Ressourcennutzung zu fördern. Dies kann zum Beispiel geschehen, indem höhere Preise in Zeiten einer höheren Gesamtnachfrage nach den Ressourcen verlangt werden und die Preise sinken, wenn auch die gesamte Ressourcennachfrage geringer ausfällt.
- 5) Um den Nutzern zu ermöglichen, auf unterschiedliche Preise unmittelbar reagieren und ihr Nachfrageverhalten anpassen zu können, müssen die Preise in Echtzeit verfügbar sein, also in dem Moment, in dem ein Nutzer einen Auftrag platzieren will.

Des Weiteren wurden die folgenden beiden Annahmen getroffen, um die Komplexität des zu entwickelnden Preismodells in geeigneter Weise reduzieren zu können. Diese wurden bereits in Abschnitt 2.2.1 erläutert und im Simulationsmodell implementiert.

- 1) Ähnlich wie in der Arbeit von Won/Olafsson (2005) wird angenommen, dass es keinen Unterschied bei der Zeit gibt, die für die Kommissionierung eines Artikels von unterschiedlichen Nutzern benötigt wird.
- 2) Es wird angenommen, dass die Artikel beider Nutzer gleichmäßig über alle verfügbaren Lagerplätze verteilt sind. Das bedeutet, dass sich auf lange Sicht keine systematischen Unterschiede bei den Laufzeiten des Kommissionierers für die Partner einstellen und die Laufwege daher nicht im Preismodell berücksichtigt werden müssen.

Um Anforderung 2, also die Deckung der Gesamtkosten durch das Preismodell, zu erfüllen, werden zunächst die Gesamtkosten C^P des Lagers während einer zuvor festgelegten Zeitperiode P als Eingangsparameter des Modells festgelegt. Der Wert für C^P ist dabei eine deterministische Größe, die unabhängig von der Anzahl an Bestellungen im Lager ist, sofern die zugrunde liegende Zeitperiode P kurz genug gewählt ist (z.B. ein Tag). Dies basiert auf der Annahme, dass die meisten Kostenfaktoren im Lager wie z.B. Personalkosten, Land- und Gebäudekosten auf langfristigen Ausgaben beruhen und nicht kurzfristig entsprechend der tatsächlichen Auslastung angepasst werden können. Aus diesem Grund wird ebenfalls davon

ausgegangen, dass C^P bekannt ist und eindeutig für das Lager bestimmt werden kann. Die dritte Anforderung, dass keine unbekannt Werte berücksichtigt werden soll, ist also folglich ebenfalls erfüllt. Darüber hinaus wird angenommen, dass unter den bekannten Umständen, die zu den Gesamtkosten C^P führen, auch die maximale Anzahl der während der Periode P möglichen Picks, n_{max}^P , bekannt ist.

Um Unterschiede bei der Nachfrage (d.h. der Bestellhäufigkeit) während P berücksichtigen zu können und so die vierte Anforderung zu erfüllen, wird die Gesamtperiode P in gleich große Zeitintervalle t mit der Länge $\tau_t = \tau$ eingeteilt. Wenn die Länge von Periode P als τ_P gegeben ist, ergibt sich folglich die Anzahl der Zeitintervalle t in P als $\frac{\tau_P}{\tau}$. Mit Hilfe dieser Berechnung ist es nun möglich, die maximale Anzahl an Picks während jedem Zeitintervall t , n_{max}^t , anzugeben:

$$n_{max}^t = n_{max} = \frac{n_{max}^P \tau}{\tau_P}. \quad (5)$$

Der Parameter τ wird gleichzeitig dazu verwendet, jeweils ein Zeitintervall mit der Länge τ vor jedem einzelnen Pick i zu definieren. Für jedes dieser Zeitintervalle vor jedem Pick i kann anschließend die Gesamtzahl an Picks in dem entsprechenden Zeitintervall, n_i^τ (inklusive Pick i selbst) berechnet werden, welche im Anschluss für die Berechnung des Preises p_i für den jeweiligen Pick i benötigt wird. Um ein besseres Verständnis des Parameters τ zu ermöglichen, wird ein kurzes Beispiel in Abbildung 12 gegeben. In der Abbildung ist die Zeitperiode P auf einem Zeitstrahl abgebildet und in vier Zeitintervalle t mit Länge τ unterteilt. Es gilt folglich $\tau_P = 4\tau$. Wenn die maximale Anzahl an Picks in P gleich n_{max}^P ist, kann die maximale Anzahl an Picks in jedem Zeitintervall t mit $n_{max}^t = \frac{n_{max}^P}{4}$ berechnet werden. In Abbildung 12 sind außerdem fünf Picks zu unterschiedlichen Zeiten durch Pfeile auf den Zeitstrahl dargestellt. Um nun beispielsweise p_5 , also den Preis für den fünften Pick berechnen zu können, muss zunächst die Anzahl an Picks im Zeitintervall τ vor Pick 5 (inklusive Pick 5 selbst), bestimmt werden. In dem hier vorliegenden Beispiel liegen insgesamt drei Picks in dem besagten Zeitintervall (Pick 3, Pick 4 und Pick 5), es gilt also $n_5^\tau = 3$. Für Pick 2 dagegen liegt neben Pick 2 selbst nur Pick 1 im Intervall τ vor dem Pick, es gilt also entsprechend $n_2^\tau = 2$.

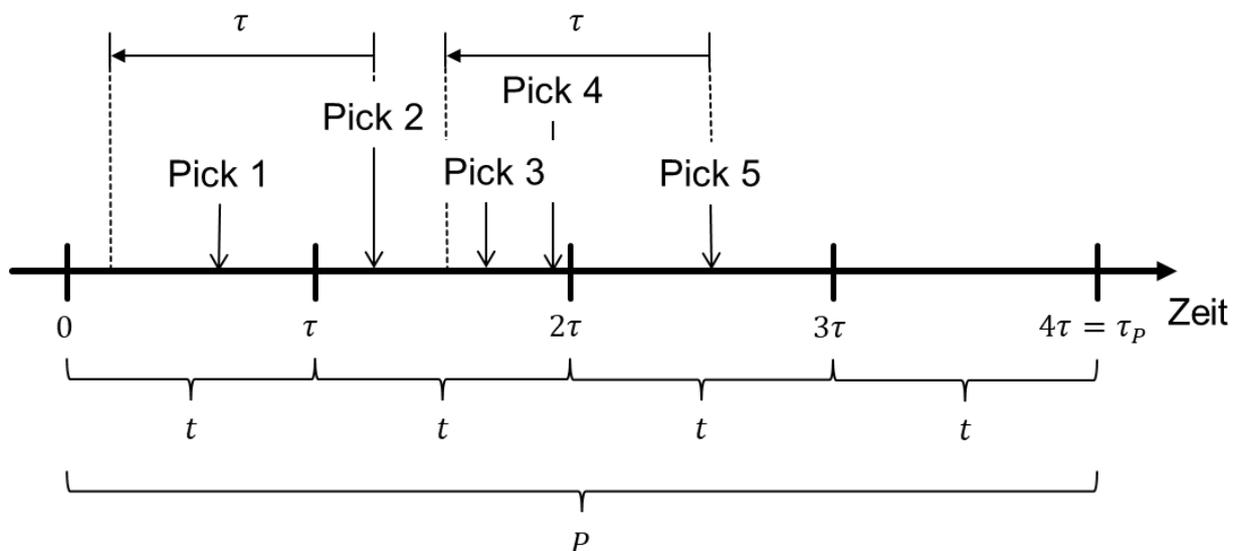


Abbildung 12: Beispiel einer Zeitperiode P , die in vier Zeitintervalle t mit jeweils gleicher Dauer τ unterteilt wurde. Während P finden insgesamt fünf Picks statt.

Mit Hilfe der zuvor definierten Parameter kann nun der Preis p_i für jeden Pick i wie folgt berechnet werden:

$$p_i = \frac{C^P}{n_{max}^P} \frac{n_i^\tau}{n_{max}^\tau} \quad (6)$$

Indem Pick i selbst in die Berechnung von n_i^τ einbezogen wird, wird sichergestellt, dass p_i stets Werte annimmt, die größer sind als Null, sogar für den allerersten Pick in P . In Gleichung 6 gibt der erste Faktor $\frac{C^P}{n_{max}^P}$ den Preis pro Pick an, für den Fall, dass die Gesamtzahl an Picks in P der maximalen Kapazität des Lagers, n_{max}^P , entspricht. Der zweite Faktor, $\frac{n_i^\tau}{n_{max}^\tau}$, gibt den Anteil an den maximal möglichen Picks in einer Periode t an, der tatsächlich im Zeithorizont τ vor Pick i kommissioniert wurde. Indem man Gleichung 5 in Gleichung 6 einsetzt, erhält man

$$p_i = C^P \frac{n_i^\tau \tau_P}{\tau n_{max}^P{}^2}. \quad (7)$$

Gemäß dieser Gleichung steigt der Preis p_i linear mit steigendem n_i^τ . Das bedeutet, dass der Preis pro Pick höher ausfällt, wenn die die Anzahl an Picks im Zeitintervall τ vor diesem Pick hoch ist. Es ist daher für die Nutzer des Lagers günstiger, ihre Bestellungen zu Zeiten mit insgesamt weniger Picks zu platzieren und teurer, wenn sie ihre Picks in Zeiten einer hohen Auslastung des Kommissionierers platzieren. Das Preismodell fördert auf diese Weise also eine

koordinierte Bestellabgabe der Nutzer im Lager. Mit jedem zusätzlichen Pick während der Periode τ vor Pick i steigt p_i um den Wert $p_i' = \frac{C^P \tau_P}{\tau n_{max}^P}$.

Allerdings hat die Methode zur Berechnung des Preises in Gleichung 7 eine Einschränkung: Wie man erkennt, fällt der Preis p_i kleiner aus, wenn n_{max}^P groß ist. Die zweite Anforderung an das Modell, nämlich, dass die durch das Preismodell erzielten Erträge größer oder gleich der Gesamtkosten C^P sein müssen, ist somit nur dann erfüllt, wenn die Auslastung der in P vorhandenen Kapazität in der Nähe von 100 % liegt. Um diese Einschränkung zu begegnen, ist es möglich, die dritte Anforderung an das Modell zu relaxieren, indem auch Prognosedaten in das Modell aufgenommen werden: So ist es möglich, die erwartete Gesamtzahl an Picks während P bereits vor Beginn von P selbst als \hat{n}_{total} abzuschätzen. Das Dach über dem Parameter soll verdeutlichen, dass es sich hierbei nicht um einen deterministischen, sondern einen geschätzten Wert handelt, der zu einem gewissen Grad mit Unsicherheit behaftet ist. Mit Hilfe dieses Parameters kann nun die erwartete Auslastung des Lagers, $\hat{\varphi}$, wie folgt berechnet werden:

$$\hat{\varphi} = \frac{\hat{n}_{total}}{n_{max}^P} \quad (8)$$

Wenn man nun Gleichung 7 mit der Inversen von Gleichung 8 wie folgt multipliziert, erhält man

$$p_i = C^P \frac{n_i^{\tau} \tau_P}{n_{max}^P} \frac{1}{\tau \hat{\varphi}} = C^P \frac{n_i^{\tau} \tau_P}{n_{max}^P \hat{n}_{total} \tau} \quad (9)$$

Diese Gleichung stellt nun sicher, dass die Summe aller durch die Nutzer gezahlten Preise gleich oder größer ist als C^P , selbst wenn die Auslastung des Lagers deutlich unterhalb von 100 % liegt. Allerdings muss in diesem Fall eine besondere Aufmerksamkeit auf die Bestimmung von \hat{n}_{total} gelegt werden, da potentielle Prognosefehler einen direkten Einfluss auf die berechneten Preise haben und gegebenenfalls zu einer Unterdeckung der Gesamtkosten im Lager führen können.

Das zentrale Ziel des Forschungsprojektes, also die Entwicklung eines Preismodells, wurde somit erfüllt. Im folgenden Abschnitt wird das Preismodell in der Simulation implementiert, um die Auswirkungen auf die Preise für die Kommissionierung zu verdeutlichen und die praktische Anwendung beispielhaft darzustellen.

2.4.1.2 Anwendung des Preismodells im Simulationsmodell

Um das Preismodell im Simulationsmodell zu implementieren, müssen zunächst die folgenden Parameter ins Modell integriert werden:

- die Dauer τ der Zeitintervalle t
- die Gesamtkosten C^P des Lagers, während der im Modell simulierten Zeitperiode
- die maximale Anzahl der während der Modelllaufzeit möglichen Picks, \hat{n}_{total} .

Zudem werden für die Analyse des Preismodells die folgenden Ausgabewerte erfasst:

- die Anzahl der Picks während der Modelllaufzeit
- der resultierende Preis pro Pick zu unterschiedlichen Zeiten während der Modelllaufzeit
- die Gesamteinnahmen des Lagers während der Modelllaufzeit, also die Summe der durch die Nutzer gezahlten Preise
- die Durchlaufzeit jeder Bestellung

Jeder dieser Ausgabewerte wird während der Simulation berechnet und anschließend für die spätere Auswertung in einer Datenbank gespeichert. Wie zuvor wurde das Modell verifiziert, indem zahlreiche Simulationsdurchläufe mit unterschiedlichen Parameterwerten gestartet wurden, die anschließend hinsichtlich der Ausgabewerte analysiert wurden.

Wie zuvor wird in dem Simulationsmodell ein achtstündiger Arbeitstag zwischen 8:00 und 16:00 Uhr simuliert, wobei jedoch nur in den ersten sieben Stunden der Modelllaufzeit Bestellungen durch Nutzer platziert werden können. Ebenfalls wie zuvor erhält jeder der beiden Nutzer im Simulationsmodell 500 der vorhandenen 1000 Lagerplätze. Im Gegensatz zu den vorherigen Simulationen, wird dieses Mal im Vorfeld festgelegt, dass jeder Nutzer insgesamt 100 Bestellungen während der Laufzeit platziert. Da sowohl für die Lagerplätze als auch für die Anzahl der Bestellungen für beide Nutzer der gleiche Wert festgelegt wird, würden statische Preismodelle, die lediglich die Gesamtzahlen berücksichtigen, jeweils die gleichen Gesamtkosten je Nutzer verursachen. Das im Forschungsprojekt entwickelte Modell ist aber in der Lage, den Einfluss einer ungleichen Verteilung der Bestellungen über die Simulationsdauer zu berücksichtigen. Um eine solche ungleiche Verteilung zu simulieren, werden die Bestellungen von Nutzer A mit Hilfe einer Normalverteilung mit dem Mittelwert um 12:00 Uhr (d.h. 240 min nach Simulationsstart) und einer Standardabweichung von 60 min über die Simulationszeit verteilt. Die Bestellungen von Nutzer B dagegen werden mit Hilfe einer uniformen Verteilung über den gesamten Simulationszeitraum verteilt. Die Gesamtkosten des Lagers während des simulierten Tages werden zu 100 Geldeinheiten (GE) festgelegt. Indem die Anzahl an Artikeln je Bestellung wie zuvor auf fünf Artikel und die maximale Anzahl an Picks im Simulationszeitraum auf 1000 festgelegt wird, wird sichergestellt, dass das Lager maximal

ausgelastet ist. Da also $\hat{\rho} = 1$ gilt, kann Gleichung 7 zur Berechnung des Preises für jeden Pick verwendet werden. Indem ein Wert von 30 min für τ festgelegt wird, wird der simulierte, achtstündige Tag in insgesamt $\frac{\tau_P}{\tau} = 16$ gleichgroße Zeitintervalle t unterteilt. Wie zuvor wird die Kapazität des Kommissionierers auf 20 Artikel und die benötigte Zeit zur Entnahme eines Artikels auf 10 s festgelegt, um die unterschiedliche Verteilung der Bestellungen isoliert als Ursache für unterschiedliche Preise betrachten zu können. Das Modell kann für zukünftige Untersuchungen jedoch einfach angepasst werden, um hierfür ebenfalls stochastische Werte zu integrieren. Die nutzerspezifischen Parameter der Simulation sind in Tabelle 9 noch einmal zusammengefasst. Die allgemeinen Modellparameter finden sich in Tabelle 10.

Tabelle 9: Nutzerspezifische Parameter des Modell.

Parameter	Wert für Nutzer A	Wert für Nutzer B
Anzahl der Lagerplätze	500	500
Anzahl Bestellungen	100	100
Verteilungsfunktion der Bestellungen	Normalverteilung ($\mu = 240 \text{ min}, \sigma = 60 \text{ min}$)	Gleichverteilung
Artikel pro Bestellung	5 Artikel	5 Artikel
Entnahmezeit pro Artikel	10 s	10 s

Tabelle 10: Allgemeine Modellparameter

Parameter	Wert
Simulierte Modellzeit (P)	8 h
Tragekapazität des Kommissionierers	20 Artikel
Dauer eines Zeitinterveralls t (τ)	30 min
Gesamtkosten des Lagers während Periode P (C^P)	100 GE
Maximale Anzahl an Picks während Periode P (n_{max}^P)	1000

Die Simulation wurde 100-mal mit den gleichen Parametern wiederholt. Dabei wurde zunächst die Anzahl der bestellten Artikel in jedem 30-minütigen Zeitintervall innerhalb der simulierten acht Stunden analysiert. Für jedes 30-Minuten-Zeitintervall ist Mittelwert der Anzahl an bestellten Artikeln aus allen 100 Simulationsläufen zusammen mit der zugehörigen Standardabweichung in Abbildung 13 dargestellt. Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der Bestellungen leicht anhand der Anzahl der bestellten Artikel abgeleitet werden kann, da jede Bestellung wie zuvor definiert genau fünf Artikel umfasst.

Abbildung 13 zeigt deutlich, dass die Anzahl der bestellten Artikel von Nutzer A eindeutig der zuvor definierten Normalverteilung folgt. Für Nutzer B folgt die Anzahl der bestellten Artikel der Gleichverteilung. Dies führt dazu, dass die Anzahl der bestellten Artikel für das gesamte Lager ungleichmäßig verteilt ist: Zwischen 8:00 und 8:30 Uhr liegt der Mittelwert bei nur 37 insgesamt bestellten Artikeln. Zwischen 11:30 und 12:00 Uhr ist dieser Wert allerdings mehr als vier Mal so hoch und liegt bei 132 Artikeln.

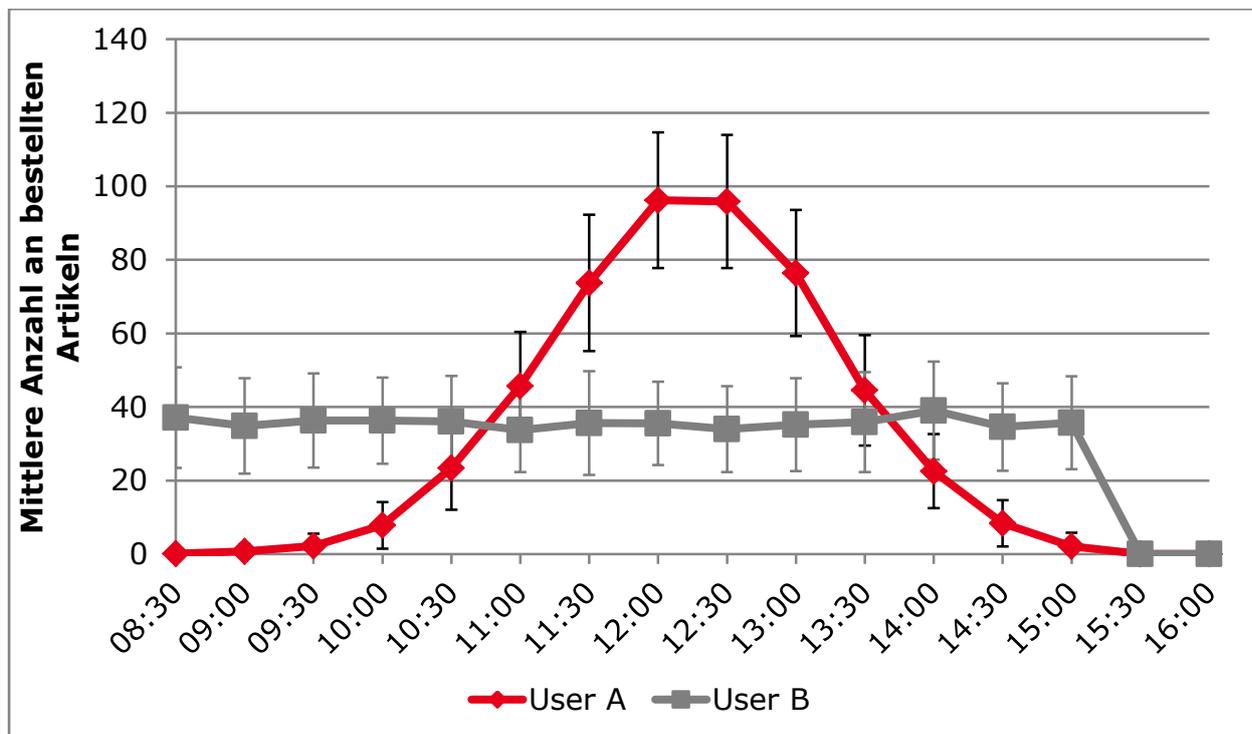


Abbildung 13: Mittlere Anzahl der in jedem 30-Minuten-Intervall bestellten Artikel aus 100 Simulationsläufen.

Die durchschnittlichen Preise pro Pick in jedem Zeitintervall sind in Abbildung 14 dargestellt. Man beachte, dass der mittlere Preis pro Pick für beide Nutzer in den letzten beiden Zeitintervallen gleich null ist. Ebenso ist er für Nutzer A im ersten Zeitintervall gleich null. Das liegt daran, dass die jeweiligen Nutzer in den entsprechenden Zeitintervallen keine Bestellungen aufgeben. Abbildung 14 zeigt darüber hinaus, dass der mittlere Preis im 30-Minuten-Zeitintervall vor 12:30 Uhr am höchsten ist. Außerdem zeigt die Abbildung, dass – wie das Modell erwarten lässt – die mittleren Preise in jedem Zeitintervall ungefähr gleich sind für beide Nutzer. Unterschiede bei den mittleren Preisen, insbesondere zu Beginn und am Ende der simulierten acht Stunden, entstehen durch die unterschiedliche Anzahl der bestellten Artikel in diesen Zeiträumen. Die Bestellung einer größeren Anzahl an Picks zu Beginn (oder am Ende) der acht Stunden erhöht die Wahrscheinlichkeit, dass n_i^T höhere Werte annimmt, auf Grund der stetig steigenden (bzw. stetig fallenden) Gesamtzahl an Picks im Lager.

Die Gesamtkosten, also die Summe aller durch die Nutzer gezahlten Preise während des simulierten Arbeitstages, unterscheidet sich für die Nutzer auf Grund der unterschiedlichen Anzahl an Picks zu Zeiten mit unterschiedlichen Preisen: Nutzer A muss im Modell durchschnittlich 76 GE (STD: 4,05) für alle seine Picks bezahlen. Nutzer B muss dagegen lediglich 52 GE (STD: 2,49) bezahlen. Das bedeutet, dass das Lager im Durchschnitt insgesamt 128 GE von beiden Nutzern einnimmt. Die Gesamtkosten in Höhe von 100 GE sind also gedeckt.

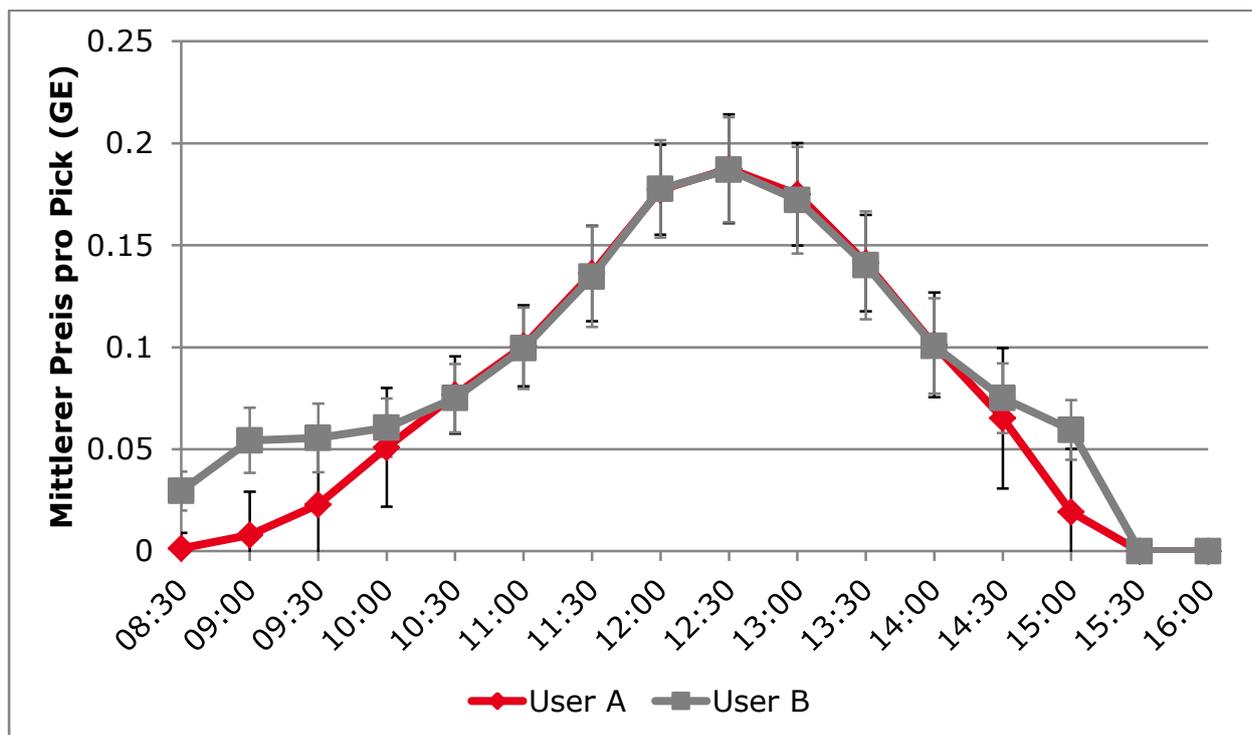


Abbildung 14: Mittlerer Preis pro Pick in jedem 30-Minuten-Zeitintervall aus 100 Simulationsläufen.

Indem das Preismodell höhere Preise in Zeiten einer höheren Auslastung des Kommissionierers berechnet, soll ein Anreiz für die Nutzer geschaffen werden, ihre Nachfrage in Zeiten einer niedrigeren Gesamtnachfrage zu verschieben. Um diesen Aspekt zu verdeutlichen, wurden zwei weitere Szenarien simuliert. Diesmal werden in beiden Szenarien die Bestellungen beider Nutzer mit Hilfe einer Normalverteilung über die simulierten acht Stunden verteilt. Allerdings liegt der Mittelwert der Normalverteilung in Szenario 1 für beide Nutzer bei $\mu = 120 \text{ min}$. Das bedeutet, dass die Nachfrage beider Nutzer um 10:00 Uhr einen Spitzenwert erreicht. In Szenario 2 dagegen entscheidet sich Nutzer A, seine Nachfrage zu verschieben, sodass der Spitzenwert um 13:00 Uhr auftritt, der Mittelwert der Verteilungsfunktion also bei $\mu = 300 \text{ min}$ liegt. Die Standardabweichung der Verteilungsfunktionen wird in beiden Szenarien und für

beide Nutzer bei $\sigma = 60 \text{ min}$ belassen. Die Verteilungsfunktionen beider Nutzer in beiden Szenarien sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Verteilungsfunktionen der Aufträge in Szenario 1 und 2.

	Nutzer A	Nutzer B
Szenario 1	Normalverteilung ($\mu = 120 \text{ min}, \sigma = 60 \text{ min}$)	Normalverteilung ($\mu = 120 \text{ min}, \sigma = 60 \text{ min}$)
Szenario 2	Normalverteilung ($\mu = 300 \text{ min}, \sigma = 60 \text{ min}$)	Normalverteilung ($\mu = 120 \text{ min}, \sigma = 60 \text{ min}$)

Wie zuvor wird jedes Szenario insgesamt 100 Mal simuliert. Die mittlere Anzahl der bestellten Artikel sowie die resultierenden, mittleren Preise pro Pick in Szenario sind in Abbildung 15 dargestellt. In gleicher Weise enthält Abbildung 16 die Werte für Szenario 2.

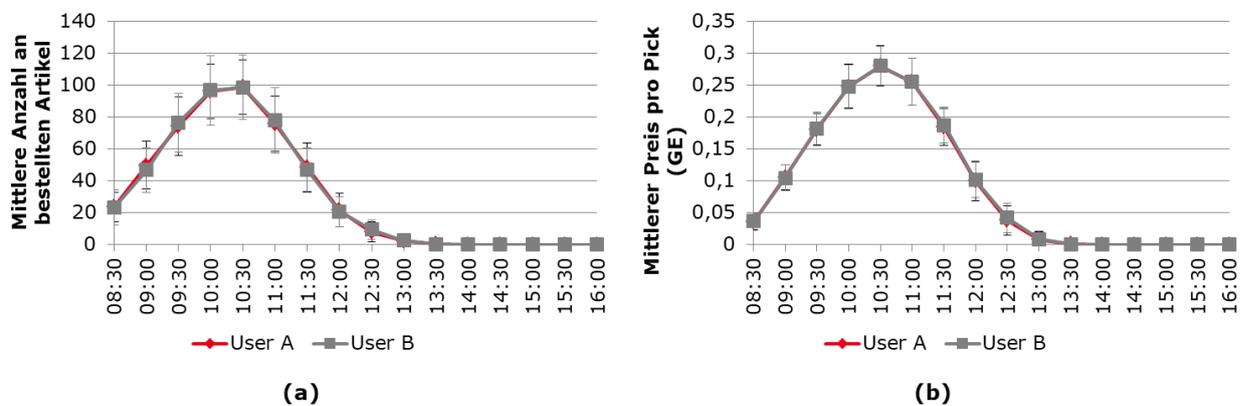


Abbildung 15: Mittlere Anzahl der bestellten Artikel (a) und mittlerer Preis pro Pick (b) in jedem 30-Minuten-Zeitintervall in Szenario 1 aus 100 Simulationenläufen.

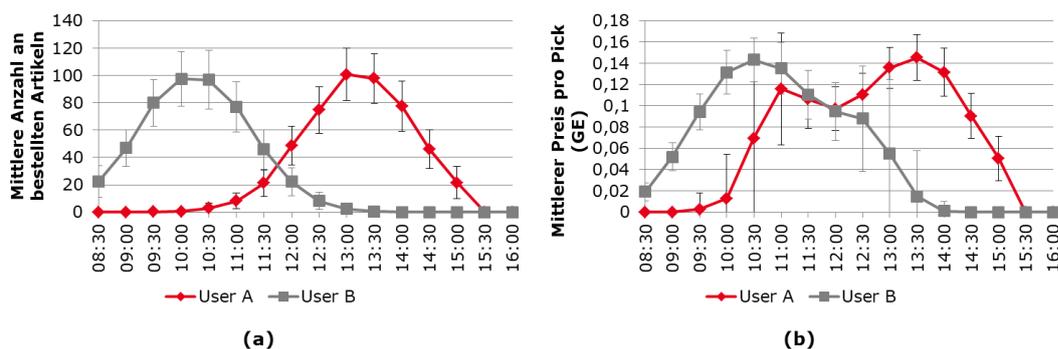


Abbildung 16: Mittlere Anzahl der bestellten Artikel (a) und mittlerer Preis pro Pick (b) in jedem 30-Minuten-Zeitintervall in Szenario 2 aus 100 Simulationenläufen.

Wie man in den Abbildungen erkennen kann, erreicht der mittlere Preis pro Pick ein Maximum von 0,28 GE (STD: 0,03) für beide Nutzer in Szenario 1. Insgesamt muss Nutzer A im Durchschnitt 103 GE (STD: 5,69) für seine 100 Bestellungen bezahlen, während Nutzer B im

Durchschnitt auf Gesamtkosten in Höhe von 104 GE (STD: 6,10) kommt. Das bedeutet, dass die Einkünfte in Szenario 1 mit durchschnittlich 207 GE doppelt so hoch sind wie die Kosten des Lagers.

Abbildung 9 zeigt jedoch, dass die Kosten für beide Nutzer sinken, wenn Nutzer A seine Spitzennachfrage auf 13:00 Uhr verschiebt. Nun erreicht der durchschnittliche Preis pro Pick ein Maximum von 0,145 GE (STD: 0,02) für Nutzer A und 0,14 GE (STD: 0,02) für Nutzer B. Der mittlere maximale Preis für Nutzer A tritt im Zeitintervall vor 13:30 Uhr auf und für Nutzer B im Zeitintervall vor 10:30 Uhr. Man beachte, dass in diesen Zeitintervallen mit einer Spitze bei den Preisen pro Pick für einen Nutzer, die durchschnittlichen Preise pro Pick für den anderen Nutzer niedriger ausfallen, da die Anzahl der Bestellungen für diesen Nutzer in diesem Zeitintervall jeweils sehr klein ist. Das bedeutet, dass in einigen Simulationsläufen keine Bestellungen in diesem Zeitintervall von einem Nutzer platziert wurden, was zu einem durchschnittlichen Preis pro Pick von null GE für den jeweiligen Nutzer führt. Die mittleren Gesamtkosten für alle 100 Bestellungen belaufen sich auf 61 GE (STD: 3,51) für Nutzer A und 57 GE (STD: 3,48) für Nutzer B. Die Gesamtkosten beider Nutzer konnten also gesenkt werden, während die gesamten Einnahmen des Lagers noch immer oberhalb der Gesamtkosten liegen. Das Preismodell erfüllt somit seine wichtigste Anforderung, indem es Anreize für Nutzer schafft, ihre Bestellungen in Zeiten einer niedrigeren Gesamtauslastung zu verschieben.

Abschließend soll der Parameter τ , also die Dauer der Zeitperioden t , noch einmal im Detail betrachtet werden. Dieser wurde in den vorherigen Untersuchungen relativ willkürlich auf einen deterministischen Wert von 30 min festgelegt, ohne dass die Auswirkungen des Parameterwertes im Detail untersucht wurden. Aus diesem Grund wurde der Einfluss unterschiedlicher Wert für τ in einer abschließenden Untersuchung simuliert und analysiert. Zu diesem Zweck wurden vier weitere Szenarien mit $\tau_1 = 5 \text{ min}$, $\tau_2 = 15 \text{ min}$, $\tau_3 = 60 \text{ min}$ and $\tau_4 = 120 \text{ min}$ definiert. Alle anderen Parameter wurden bei den Werten in den Tabellen 9 und 10 belassen, es wird also wie zuvor eine Nachfragespitze von Nutzer A um 12:00 Uhr simuliert. Wie zuvor wurde die Simulation jeweils 100 Mal für jeden Wert von τ wiederholt. In Abbildung 17 sind die jeweils resultierenden mittleren Preise pro Pick in jedem 30-Minuten-Intervall aufgetragen. Zudem wurden die Ergebnisse aus den vorherigen Studien, bei denen $\tau = 30 \text{ min}$ galt, in die Abbildung aufgenommen.

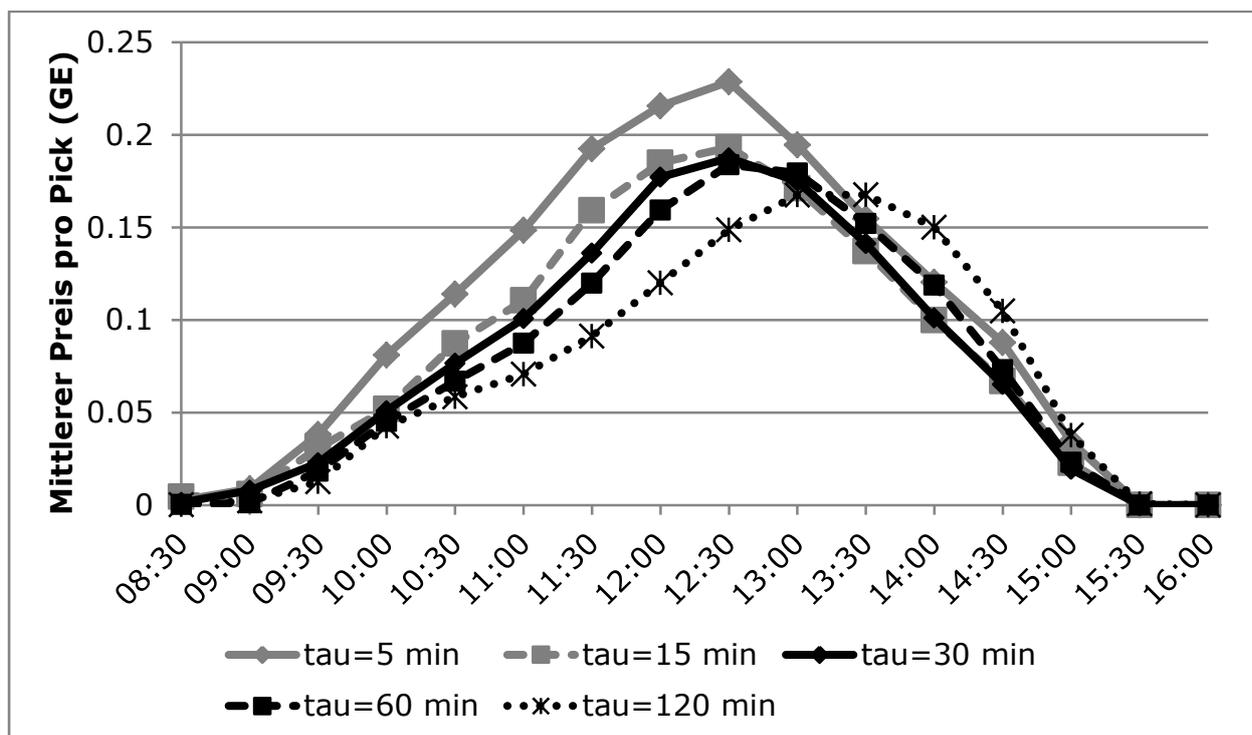


Abbildung 17: Mittlerer Preis pro Pick von Nutzer A in jedem 30-Minuten-Zeitintervall für unterschiedliche Werte für den Parameter τ .

Wie die Abbildung zeigt führen höhere Werte für τ zu niedrigeren mittleren Preisen pro Pick. Zudem verschiebt sich der Spitzenwert beim mittleren Preis pro Pick hin zu späteren Zeitintervallen, wenn τ steigt. Das bedeutet, dass kleinere Werte für τ prinzipiell die Genauigkeit des Preismodells erhöhen, indem Spitzenwerte bei den Preisen zeitlich näher am Auftreten der ursächlichen Nachfragespitzen liegen. Allerdings liegt das gesamte Einkommen des Lagers näher an den tatsächlichen Kosten C^P , wenn τ größer ist. Anders ausgedrückt: Je kleiner τ , desto weiter liegen die Einnahmen des Lagers über den Kosten. In einem vollständig kooperativen Lager könnte es jedoch im Interesse der Partner liegen, einen möglichst kleinen Surplus zu generieren, sodass die Summen der durch jeden Partner bezahlten Preise die Gesamtkosten nicht übersteigen.

2.4.2 Preismodell für die kooperative urbane Distribution

Auch im Kontext der kooperativen urbanen Distribution stellt sich die Frage, wie die Kosten beziehungsweise Vorteile der kooperativen Distribution möglichst fair und anreizwirksam aufgeteilt werden könnten. Hierfür lassen sich, wie bereits zuvor beschrieben, eine Reihe von Ansätzen in der Spieltheorie finden (z. B. Shapley Value, Equal Profit Methode, Nucleolus,...). Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang die Sicherstellung der individuellen Rationalität der Kooperationspartner. Nach Frisk et al. (2010) gilt dabei eine Kostenaufteilung als individuell rational, wenn kein Teilnehmer der Kooperation mehr als seine "Stand-Alone-

Kosten" zahlt. Die "Stand-Alone-Kosten" beschreiben die Kosten des Teilnehmers, die anfallen würden, wenn keine Koalitionen gebildet werden. Ein weiterer Aspekt ist die Effizienz der Kostenaufteilung, welche besagt, dass alle Kosten der Kooperation aufgeteilt werden sollten (vgl. Frisk et al. 2010). Zusammengenommen definieren beide Aspekte den sogenannten Kern, welcher die Kostenaufteilungen, die beide Aspekte erfüllen, beschreibt. Liegt eine Kostenaufteilung nicht im Kern gilt diese als nicht stabil (vgl. Frisk et al. 2010). Es kann mitunter jedoch sein, dass der Kern leer ist, d. h. es gibt keine Kostenaufteilung welche beide Aspekte erfüllt.

Mittels des im Projekt entwickelten Simulationsmodells, welches sowohl kooperative als auch nicht-kooperative Distributionsszenarien abbilden kann, wurden im Projekt vier Methoden zur Kostenallokation aus der Literatur untersucht. Dabei wurde eine Fallstudie, welche die konsolidierte Belieferung von Einzelhändlern in Frankfurt am Main durch Transportunternehmen aus dem Rhein-Main-Gebiet betrachtet, gewählt. Folgende Kostenaufteilungsmethoden wurden darin implementiert und simulationsbasiert verglichen:

- Shapley-Value,
- Equal-Profit-Methode
- Auftragsproportional
- Mengenproportional

Die ersten beiden Methoden benötigen dabei umfangreiche Informationen zu den verschiedenen Kosten aller Kooperationspartner und aller möglichen Subkoalitionen der Kooperation und könnten daher in der Praxis schwieriger zu implementieren sein. Der Shapley-Value garantiert darüber hinaus nicht zwangsläufig die individuelle Rationalität der Kooperationspartner. Die beiden proportionalen Methoden lassen sich hingegen bei niedrigem Informationsbedarf schnell und einfach auf Basis der Auftragsdaten berechnen und erfüllen die Anforderung der Effizienz (vgl. Frisk et al. 2010, Shapley 1953). Frisk et al. (2010) zufolge sind proportionalen Methoden daher auch die bevorzugten Methoden aus Sicht von Unternehmen, können jedoch zu nicht stabilen Kostenaufteilungen führen und somit das Kriterium der individuellen Rationalität verletzen.

Ähnlich zu den Praxisberichten aus der Literatur (vgl. van Duin et al. 2010) und den beiden zuvor beschriebenen Fallstudien zeigt sich, dass die wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit der Kooperation aufgrund der zusätzlichen Handling- und Fixkosten der UCCs oft nicht gegeben ist und es weiterer Maßnahmen bedarf um diese überhaupt erst zu ermöglichen. Somit ist der Kern der Kostenallokationen in vielen Kooperationsszenarien leer, wodurch keine stabilen Kostenaufteilungen gefunden werden können. Des Weiteren zeigen die in Abbildung 18

dargestellten Ergebnisse der Simulation eines UCCs mit unterschiedlichen Aufteilungsmethoden nur geringe Unterschiede zwischen den modellierten Methoden.

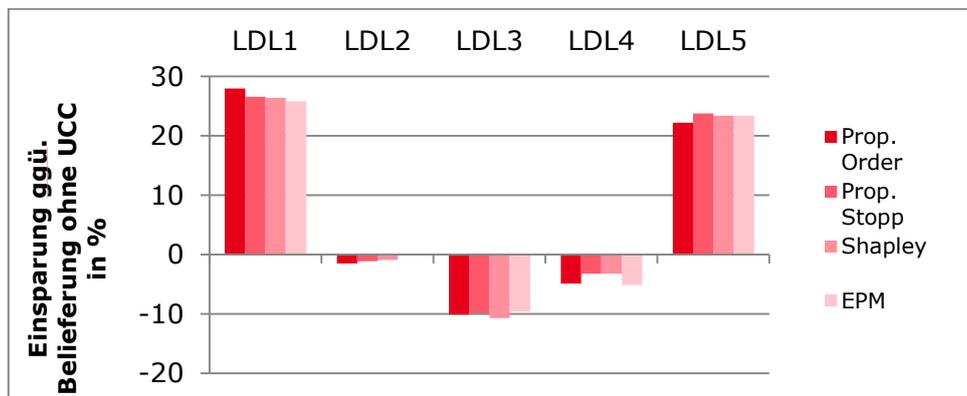


Abbildung 18: Vergleich der Einsparungen je Kostenaufteilungsmethoden und Logistikdienstleister.

Das Problem der mangelnden Wirtschaftlichkeit der kooperativen urbanen Distribution in Bezug auf die Kostenaufteilung wird auch in der Literatur erkannt und verschieden behandelt. Dahlberg et al. 2018 betrachten zum Beispiel nur die variable Kosten der Distribution. Hezarkhani et al. 2019 nehmen beispielsweise ein grundlegendes Einsparpotenzial je Kooperationspartner durch die Auslagerung der Transport an ein UCC an. Dahlberg et al. 2018 implementieren darüber hinaus in Ihrem Vergleich von verschiedenen Kostenaufteilungsmethoden flexible Subvention für das UCC, welche die individuelle Rationalität der Kooperationspartner sicherstellen sollen. Hezarkhani et al. 2019 gehen dagegen davon aus, dass der UCC-Betreibern täglich basierend auf den angekündigten Transportaufträgen der Logistikdienstleister die Dienstleister, welche zu einer stabilen Kostenaufteilung führen würden, auswählt. Ein ähnliches Vorgehen wird auch durch Frisk et al. (2010) in einem anderen Kontext vorgeschlagen.

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde der Fokus des Projektteils der urbanen Distribution erweitert, sodass in Kapitel 2.3.2 untersucht wurde, unter welchen Bedingungen kooperative UCCs eine attraktive Alternative für Transportunternehmen in der urbanen Distribution darstellen könnten. Beispielsweise können verkehrsbeschränkende Maßnahmen neben Subventionen zum Nutzen von Kooperationen in der urbanen Distribution beitragen. Dadurch könnten Kooperationen gebildet werden, deren Kern nicht leer ist. Bezüglich der Kostenaufteilung ist hierbei zwischen Methoden mit niedrigen Informationsbedarfen und keiner Gewährleistung der individuellen Rationalität auf der einen Seite und Methoden mit hohen Informationsbedarfen und einer Gewährleistung der individuellen Rationalität (z. B. Equal-Profit-Methode) auf der anderen Seite abzuwägen. Letztendlich hängt die Auswahl einer geeigneten

Methode daher von der Informationsverfügbarkeit (z. B. Kosten- und Auftragsdaten) sowie der gewünschten Komplexität bzw. Nachvollziehbarkeit ab. Bei Kooperationen mit vielen Teilnehmern bzw. vielen Transportaufträgen könnten zudem die Rechenzeitanforderungen der Methoden beachtet werden, da bei vielen Methoden die Kosten aller Kombinationsmöglichkeiten der Kooperation berechnet werden müssen.

2.5 Arbeitspaket 5 – Leitfaden und Projektabschluss

Zielsetzung und Ausgangslage: Das letzte Arbeitspaket dient dazu, die zentralen Ergebnisse des Projektes in Form eines Leitfadens aufzubereiten und für den praktischen Einsatz nutzbar zu machen. Auf diese Weise soll sich der Nutzer über die Forschung zu den verschiedenen Dimensionen der Projektbearbeitung informieren können. Die Informationen enthalten den Stand der Forschung auf Basis der jeweiligen Entscheidungen, die auf den einzelnen Stufen des Projektes getroffen wurden. Schwerpunkt sollen hier die Erkenntnisse hinsichtlich der Ausgestaltung des Preismodells sein. Die Projektarbeit wird in einem umfassenden Abschlussbericht zusammengefasst.

Vorgehen: Bei dem hier vorliegenden Dokument handelt es sich um den zentralen Abschlussbericht des Projektes, der die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete aufbereitet und für potentielle Nutzer gebündelt wiedergibt. Der Bericht soll auch dazu genutzt werden, die Ergebnisse kritisch zu reflektieren und hinsichtlich der praktischen Umsetzbarkeit zu evaluieren. Der Abschlussbericht wird auf den Websites des Fachgebietes Unternehmensführung und Logistik sowie der Forschungsvereinigung offen und diskriminierungsfrei zur Verfügung gestellt. Zusätzlich werden die Ergebnisse in unterschiedlichen wissenschaftlichen Veröffentlichungen und auf wissenschaftlichen und praxisnahen Konferenzen während und nach der Projektlaufzeit einem breiten Publikum aus Wissenschaft und Praxis vorgestellt. Auf diese Weise soll es Anwendern ermöglicht werden, die Projektergebnisse als möglichen Lösungsansatz für konkrete Anwendungsfälle zu identifizieren. Zudem sollen die Ergebnisse als Ausgangsbasis für zukünftige Forschungsarbeiten und die Weiterentwicklung des bestehenden Modells zugänglich gemacht werden. Zu diesem Zweck wurde auch das erstellte Simulationsmodell anwenderfreundlich aufbereitet und soll in Zukunft auf der Website des Fachgebietes Unternehmensführung und Logistik zum freien Download angeboten werden.

Zentrales Ergebnis des Forschungsprojektes ist die Entwicklung eines Preismodells für eine manuelle Person-zur-Ware-Systeme in kooperativen Lagerhäusern mit gemeinsam genutzten Kommissionierern als gemeinsame Ressource. Das Preismodell ist in der Lage, einen Preis pro Pick basierend auf der gesamten Nachfrage nach Kommissionierleistungen innerhalb eines zuvor definierten Zeithorizontes zu berechnen. Da das Modell einen höheren Preis in Zeiten höherer Gesamtnachfrage berechnet, wird ein Anreiz für die Nutzer des Lagers geschaffen, ihre

Kommissioniernachfrage in Zeiten einer geringeren Gesamtauslastung zu verschieben. So wird also die gleichmäßige Auslastung der Kommissionierer durch das Preismodell gefördert. Das Preismodell wurde in einem agentenbasierten Simulationsmodell angewandt, wobei gezeigt werden konnte, dass die im Mittel durch die Nutzer gezahlten Preise für die Kommissionierung die Kosten des Lagers in Summe in jedem der simulierten Szenarien übersteigen. Das Preismodell zeichnet sich zudem durch eine relativ einfache Anwendbarkeit aus, da die benötigten Daten in der Regel verfügbar und leicht zu erheben sind und keinerlei Unsicherheit unterliegen.

Selbstverständlich weist das erstellte Preismodell auch einige Limitationen auf: In der vorliegenden Form lässt sich das Modell am besten auf Lager anwenden, die nah an einer 100 %-igen Auslastung der Kommissionierung operieren. Bei einer geringeren Auslastung muss die tatsächliche Auslastung eines Untersuchungszeitraumes vorab geschätzt werden und ist damit mit Unsicherheit behaftet. Allerdings wird davon ausgegangen, dass die zu erwartende Auslastung in der Praxis mit einer ausreichenden Genauigkeit geschätzt werden kann, beispielsweise durch die Nutzung historischer Daten. In zukünftigen Forschungsarbeiten wäre es allerdings denkbar, die Auswirkungen dieser Schätzungen sowie unterschiedlicher Schätzgenauigkeiten und Prognosefehler systematisch zu untersuchen.

Das Preismodell wurde zudem bisher lediglich im Rahmen eines generischen Simulationsmodells mit nur zwei Lagerhausnutzern und einem einzelnen Kommissionierer angewandt. Die Ergebnisse dieser Simulation sind zwar sehr vielversprechend hinsichtlich einer praktischen Anwendbarkeit des Modells. Allerdings sollte das Preismodell zusätzlich mit Hilfe realer Kommissionierdaten in einem real existierenden Lager getestet und angewandt werden, um zuverlässigere Aussagen hinsichtlich der praktischen Umsetzbarkeit ableiten zu können. In diesem Kontext ist es darüber hinaus ratsam, die kalkulierten Preise des Modells mit den Berechnungen anderer Preismodelle zu vergleichen.

Im Teilbereich der urbanen Distribution ist die Untersuchung der Einflussfaktoren auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis von Kooperationen in der urbanen Distribution eines der zentralen Ergebnisse. Denn um überhaupt stabile Kostenaufteilungen für Kooperationen finden zu können, muss die Wirtschaftlichkeit und Vorteilhaftigkeit aus Kostensicht grundlegend gegeben sein. Durch die Untersuchung verschiedener Einflussfaktoren, wie beispielsweise Verkehrsrestriktionen und die Anzahl der Distributionsstufen, konnte gezeigt werden, wie unterschiedliche Faktoren zur Attraktivität von kooperativen Konsolidierungskonzepten beitragen könnten. Für KM-LDL kann hierdurch verdeutlicht werden, dass kooperative Konsolidierungskonzepte eine Möglichkeit bieten um den steigenden operativen Anforderungen

im urbanen Güterverkehr zu begegnen und dass sowohl proportionale als auch spieltheoretische Methoden zur Aufteilung der Kosten der Kooperation genutzt werden könnten.

3. Verwendung der Zuwendungen

Die Projektbearbeitung fand im Jahr 2017 durch die beiden wissenschaftlichen Mitarbeiter Anne Friedrich (Januar) und Jan-Karl Knigge (Februar, Oktober bis Dezember) statt. Aufgrund der verzögerten Nachbesetzung offener Stellen am Fachgebiet konnten im Zeitraum März-September 2017 keine Mitarbeiter auf das Projekt gebucht werden. Das Projekt wurde aus diesem Grund kostenneutral um sechs Monate verlängert und eine entsprechende Ratenverschiebung wurde beantragt. Von 2018 bis zum Projektende in 2019 fand die Projektbearbeitung durch den wissenschaftlichen Mitarbeiter Jan-Karl Knigge statt. Aufgrund der jeweils zweimonatigen Elternzeit von Herrn Knigge in den Jahren 2018 und 2019 wurde jedoch für weitere vier Monate während des Berichtszeitraumes kein Mitarbeiter auf das Projekt gebucht. Insgesamt betrug der Einsatz des wissenschaftl.-techn. Personals (Personenmonate) folglich 24 Monate. Eine Übersicht findet sich in Tabelle 12.

Tabelle 12: Übersicht über den Einsatz des wissenschaftlich-technischen Personals (Personenmonate)

Zeitraum	Mitarbeiterin / Mitarbeiter	Personenmonate
01.2017	Anne Friedrich	1
02.2017	Jan-Karl Knigge	1
10.2017 - 07.2018	Jan-Karl Knigge	10
08.2018	Jan-Karl Knigge	0,5
10.2018	Jan-Karl Knigge	0,5
11.2018 - 07.2019	Jan-Karl Knigge	9
08.2019	Jan-Karl Knigge	0,5
10.2019	Jan-Karl Knigge	0,5
11.2019	Jan-Karl Knigge	1
Summe:		24

Beide Mitarbeiter haben über den jeweils angegebenen Bearbeitungszeitraum an dem Projekt gearbeitet. Durch ihr abgeschlossenes Hochschulstudium (Wirtschaftsingenieurwesen – M.Sc.) sind beide Mitarbeiter dem wissenschaftlich-technischen Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) zuzuordnen. Durch den notwendigen, anspruchsvollen Methodeneinsatz ist das vorliegende Qualifikationsniveau der Mitarbeiter im vorliegenden Vorhaben unabdingbar.

Anne Friedrich hat das Projekt im Januar 2017 bearbeitet und sich dabei ausschließlich mit der Bearbeitung des ersten Arbeitspaketes beschäftigt. Im Februar 2017 sowie im Zeitraum Oktober bis einschließlich Dezember 2017 wurde das Projekt durch Jan-Karl Knigge bearbeitet. Er hat die Arbeiten von Frau Friedrich fortgesetzt.

Das Projekt wurde während des Berichtszeitraumes durch die Hilfskräfte Paul Rieger, Daniel Cramer, Johannes Rentschler, Christian Kunz, Mike Raiser, Tobias Mahncke, Frederik Uellner, Claas Weinandi und Prisca Sarnow (A.3 des Finanzierungsplans) in unterschiedlichem Umfang unterstützt. Ausgaben für Geräte (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) und Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans) sind im Finanzierungsplan nicht vorgesehen und dementsprechend im vorliegenden IGF-Vorhaben nicht angefallen.

4. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die geleistete Arbeit sowie die erzielten (Teil-)Ergebnisse entsprechen in Umfang und Qualität den Vorgaben aus dem Projektantrag. Mit der zusätzlichen Betrachtung urbaner Distribution neben dem Betrieb kooperativer Lager wird der ursprüngliche Projektplan zudem sinnvoll um einen weiteren Aspekt erweitert. Der frühzeitige Beginn der Entwicklung des Simulationsmodells und der relativ hohe Zeitanteil, der diesem Projektbaustein zuteil geworden ist, erscheinen auf Grund der hohen Komplexität der Fragestellung als angemessen. Insbesondere die agentenbasierte Simulation stellt ein mächtiges Werkzeug und daher eine geeignete Forschungsmethode dar, um verschiedene Aspekte der urbanen Logistik systematisch zu untersuchen und den Einfluss unterschiedlicher Verhaltensweisen zu analysieren. Zudem konnte das erstellte Preismodell im Rahmen der weiteren Arbeitspakete kontinuierlich angepasst und erweitert werden und so systematisch zur Beantwortung der unterschiedlichen Fragestellungen im Rahmen des Projektes genutzt werden.

Durch die systematische Variation ausgewählter Parameter erlauben die beiden Simulationsmodelle die gezielte Untersuchung von Einflussfaktoren und können dabei zusätzlich Unsicherheiten in Form stochastischer Parameter berücksichtigen. So unterstützten die beiden Simulationen die Bearbeitung der übrigen Arbeitspakete sinnvoll und ermöglichten die Erarbeitung eines geeigneten Preismodells für den Betrieb kooperativer Logistikeinrichtungen, das zur Beantwortung der unterschiedlichen Fragestellungen im Rahmen des Projektes genutzt werden konnte. Auch konnte das Preismodell mit Hilfe der Simulation anwendungsbezogen hinsichtlich der gestellten Anforderungen überprüft und bewertet werden. Im Rahmen des angestrebten anwendungsorientierten Ergebnistransfers in die Wirtschaft stellen das entwickelte Preismodell sowie die Untersuchung der Einflussfaktoren und Kostenaufteilungsmethoden für den Bereich der urbanen Distribution die zentralen Ergebnisse des Projekts dar.

Die begleitend durchgeführten Literaturrecherchen, Fallstudien und Experteninterviews im Rahmen der bisherigen Projekttreffen dienten zudem dazu, das Aufgabenfeld sinnvoll abzugrenzen und einzuordnen. Diese Basis war notwendig, um die Entwicklung eines validen Simulationsmodells sicherzustellen und einen kontinuierlichen Praxisbezug des Vorgehens sowie der Ergebnisse zu gewährleisten.

5. Bewertung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU sowie ihres innovativen Beitrags und ihrer industriellen Anwendungsmöglichkeiten

Die Herausforderungen in der urbanen Logistik sind allgegenwärtig und haben im Zeitraum der Projektbearbeitung sogar vielerorts noch zugenommen. Gleichzeitig steigt die Aufmerksamkeit für diesen Themenkomplex wie die steigende öffentliche Wahrnehmung insbesondere des innerstädtischen Verkehrs zeigt. Das Forschungsprojekt widmete sich folglich einem hochaktuellen Thema, dessen operative Umsetzung sich für Logistikunternehmen als nicht trivial herausstellt. Während große Unternehmen und insbesondere KEP-Dienstleister über die finanziellen Möglichkeiten verfügen, eigene innovative Lösungen für die Herausforderungen zu entwickeln, laufen insbesondere KMU Logistikdienstleister Gefahr, aus urbanen Räumen verdrängt zu werden. Genau hier setzt das Forschungsprojekt gezielt an indem es die Möglichkeiten horizontaler Kooperationen in der urbanen Logistik systematisch untersucht und so Möglichkeiten für diese KMU schaffen will, ihre eigene Marktposition zu verbessern und den Herausforderungen der urbanen Logistik zu begegnen.

Wie die eingangs durchgeführte Literaturanalyse und die Diskussionen im Rahmen des projektbegleitenden Ausschusses gezeigt haben, handelt es sich bei der Untersuchung kooperativer Lösungen um einen hochgradig innovativen Ansatz. Zwar gibt es bereits einige wenige erste Anwendungsbeispiele in der urbanen Logistik, diese scheiterten jedoch häufig an einer fehlenden langfristigen Wirtschaftlichkeit oder fehlender Bereitschaft der Partner, die Kooperation aufrecht zu halten und auszubauen. Viele dieser Kooperationen funktionieren daher nur, solange externe Restriktionen die beteiligten Unternehmen zu einer Teilnahme zwingen oder ausreichend große Anreize zur Teilnahme schaffen. Mit dem Ziel, ein Preismodell für horizontale Kooperationen in der Logistik zu entwickeln, trägt das Forschungsprojekt also dazu bei, zukünftig eigenständig tragfähige Kooperationen in der urbanen Logistik zu ermöglichen.

Weiterhin wurde mit Hilfe der Simulation eine innovative und technisch herausfordernde Methode gewählt, das Preismodell zu entwickeln und anwendungsbezogen hinsichtlich definierter Anforderungen zu testen. Das Simulationsmodell steht als ein Projektergebnis zur weiteren Verwendung zur Verfügung und kann in zukünftigen Projekten gezielt weiterentwickelt werden. Weiterhin kann das bestehende Simulationsmodell zukünftig dazu genutzt werden, das Preismodell mit Hilfe der operativen Daten realer Kooperationen zu testen und so gezielt

Einsatzmöglichkeiten zu evaluieren. Interessierten Unternehmen wird somit die Möglichkeit geboten, risikofrei die Auswirkungen der Implementierung des Preismodells zu simulieren, was insbesondere KMU, welche häufig wenig Spielraum für risikobehaftete Veränderungen haben, zugutekommt.

Mit Hilfe der Simulation konnte zudem gezeigt werden, welche Auswirkungen unterschiedliches Nachfrageverhalten eines Partners innerhalb einer Kooperation auf die Kennzahlen anderer Partner haben können. So wurde erstmals verdeutlicht, wie stark sich Partner gegenseitig in horizontalen Kooperationen beeinflussen können. In diesem Zusammenhang wurde insbesondere die manuelle Kommissionierung unter einer begrenzten Ressourcenverfügbarkeit als kritischer Anwendungsfall identifiziert. Die manuelle Kommissionierung erwies sich insbesondere deswegen als wichtiger Untersuchungsgegenstand, da es bisher keine Untersuchungen gibt, die sich mit dem Einsatz von Preismodellen explizit für die manuelle Kommissionierung auseinandersetzen. Das hat zur Folge, dass in der Praxis zumeist Preismodelle verwendet werden, die nicht in der Lage sind, unterschiedliches Nachfrageverhalten der Partner zu berücksichtigen und ein kooperatives Verhalten in dieser Beziehung zu fördern. Indem das Forschungsprojekt diese Forschungslücke in den Fokus nimmt, schafft es folglich einen innovativen und anwendungsorientierten Beitrag.

Im Projektteil zur urbanen Distribution konnten mittels der Simulation zum einen Einflussfaktoren auf die Wirtschaftlichkeit von urbanen kooperativen Konsolidierungskonzepten analysiert werden, zum anderen konnten verschiedene etablierte Preismodelle, welche bis dato nicht für Konsolidierungskonzepte angewandt wurden, verglichen werden. Die Kosten-Nutzen-Analyse urbaner kooperativer Konsolidierungskonzepte zeigt, dass Urban Consolidation Center und Micro-Consolidation Center sowohl aus Kosten- als auch Umweltsicht Vorteile bringen können. Somit konnte gezeigt werden, dass eine unternehmensübergreifende Konsolidierung nicht nur aus gesellschaftlicher Perspektive, sondern auch aus der Perspektive von KM-LDL nutzbringend sein kann. Aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren auf das Kosten-Nutzen-Verhältnis von unternehmensübergreifenden Konsolidierungskonzepten, ist die Analyse der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit jedoch komplex. Das entwickelte Simulationsmodell bzw. Simulationsframework konnte hierbei jedoch einen Beitrag leisten, indem verschiedene Einflussfaktoren systematisch untersucht wurden. Zukünftig könnte das Modell zudem für weitere Untersuchungen mit fallspezifischen Daten genutzt werden.

Schließlich konnte im Projekt ein Preismodell für die manuelle Kommissionierung entwickelt werden, welches die zuvor als zentral definierten Herausforderungen erfüllt. So kann das Preismodell nicht nur einen Preis je Pick in Echtzeit berechnen. Es belohnt auch kooperatives Verhalten, indem eine gleichmäßige Auslastung durch die Partner zu niedrigeren Preisen führt.

Besonders für KMU ist dabei relevant, dass das Preismodell ohne Vorhersagedaten oder Daten, die mit Unsicherheit behaftet sind, auskommt. Auch müssen keine wettbewerbsrelevanten Informationen an andere Nutzer innerhalb der Kooperation weitergegeben werden, sodass die beteiligten KMU keine Bedrohungen ihres Geschäftsmodells durch das Preismodell fürchten müssen. Es wird also erwartet, dass das Preismodell auch für kleine Unternehmen ohne große Herausforderungen innerhalb einer Kooperation eingesetzt und genutzt werden kann.

Eine Einschränkung der Projektergebnisse betrifft die bisher fehlende praktische Anwendung des Preismodells: Bisher konnte das Modell lediglich anhand des generischen Simulationsmodells getestet werden. Eine praktische Implementierung konnte bisher nicht erreicht werden. Auch eine Simulation mit Hilfe realer Lagerhausdaten konnte auf Grund fehlender Datenverfügbarkeit im Rahmen des Projektes nicht realisiert werden. Das generische Modell konnte aber für eine Vielzahl unterschiedlicher Parametersettings die generelle Anwendbarkeit des Preismodells nachweisen. Auch wurde im Simulationsmodell bisher lediglich ein generisches Lager mit zwei Nutzern und einem Kommissionierer modelliert. Indem das Preismodell jedoch einen Preis auf Basis eines einzelnen Picks berechnet ohne dabei zwischen Nutzern zu unterscheiden, lässt es sich problemlos auf komplexere Anwendungsfälle übertragen, ohne dass Anpassungen notwendig sind.

Mit dem entwickelten Preismodell als zentrales Projektziel liefert das Forschungsprojekt somit einen innovativen Beitrag um langfristig tragfähige horizontale Kooperationen für den Einsatz in der urbanen Logistik zukünftig zu ermöglichen. Das Preismodell kann dabei direkt und ohne große Herausforderungen eingesetzt werden und wird, genau wie das Simulationsmodell, offen zur Verfügung gestellt. Die Projektergebnisse kommen damit insbesondere KMU zugute, die bei der Umsetzung horizontaler Kooperationen sinnvoll und anwendungsnah unterstützt werden.

6. Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Der Transfer der im Projekt erzielten Ergebnisse erfolgte in Teilen bereits während der Projektlaufzeit und wurde im Projektverlauf entsprechend der Zwischenberichte weiter konkretisiert. Die Transferstrategie stützt sich auf Workshops, Veranstaltungen mit der Praxis, Publikationen in praxisnahen und wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie die Vorstellung der Ergebnisse auf Konferenzen und Fachtagungen. Ziel war es, fortlaufend Feedback von Unternehmensvertretern zu erhalten, um die Praxistauglichkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Im Folgenden werden zunächst während der Projektlaufzeit durchgeführte Transfermaßnahmen beschrieben. Anschließend erfolgt die Schilderung von noch geplanten Transfermaßnahmen.

6.1 Transfermaßnahmen während der Projektlaufzeit

Während der Projektlaufzeit wurden Maßnahmen in vier Bereichen zum kontinuierlichen Transfer der Forschungsergebnisse in die Wirtschaft durchgeführt. Tabelle 13 enthält die durchgeführten Transfermaßnahmen. Diese werden unter der Tabelle mit Verweisen auf zusätzliche Detailinformationen beschrieben.

Tabelle 13: Während der Projektlaufzeit durchgeführte Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen
A: Workshops mit dem Projektbegleitenden Ausschuss	Validierung des Lösungskonzepts	A1: Workshops A2: Fallstudien A3: Experteninterviews
B: Veranstaltung mit der Praxis	Bekanntmachen des Lösungskonzepts und Testen der Simulation	B1: Vorstellung des Projektes im Rahmen des DB Schenker Lab an der TU Darmstadt B2: Zukunftswerkstatt der Innovationsallianz DB und TU Darmstadt B3: Sitzungen des projektbegleitenden Ausschusses B4: Vorstellung des Projektes im Rahmen der Science Pitches auf dem Deutschen Logistik Kongress B5: Vorstellung der Projektergebnisse im Rahmen des Verkehrsausschusses des Bundesverband Großhandel, Außenhandel, Dienstleistungen e.V.
C: Publikationen in praxisnahen Fachjournals	Diskussion der (Zwischen-) Ergebnisse	C1: Proceedings of the 3 rd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic 2017

		<p>C2: Online-Dossier der Bundesvereinigung Logistik e.V.</p> <p>C3: Deutsche Verkehrszeitung (DVZ)</p> <p>C4: LogReal Direkt</p> <p>C5: Wirtschaftswissenschaftliches Studium (WiSt)</p> <p>C6: Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference (2x)</p> <p>C7: Buchkapitel in WCTRS Book Series: „Urban Freight Transportation Systems“</p> <p>C8: Proceedings of the World Conference on Transport Research</p>
D: Konferenzbesuch	Wissenschaftliche Diskussion	<p>D1: 3rd ICPLT 2017</p> <p>D2: DLK 2017</p> <p>D3: DLK 2018</p> <p>D4: WSC 2018 (2x)</p> <p>D5: WCTR 2019</p>

Zur Entwicklung und kontinuierlichen Validierung des Forschungsansatzes sowie des Simulationsmodells werden in erster Linie die Treffen des projektbegleitenden Ausschusses sowie in diesem Zusammenhang geführte Experteninterviews genutzt. Im Rahmen von Besuchen bei Lagerhausbetreibern, Logistikdienstleistern, Spediteuren und produzierenden Unternehmen konnte die theoretische Betrachtung zudem eng mit den realen Gegebenheiten in der Praxis abgestimmt und verknüpft werden.

A: Workshops mit dem Projektbegleitenden Ausschuss

A1: Es wurde im Jahr 2017 ein Treffen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Das Treffen fand am 30.11.2017 mit fünf externen Teilnehmern statt. Im Jahr 2018 wurden zwei Treffen des projektbegleitenden Ausschusses durchgeführt. Die Treffen fanden am 08.02.2018 und am 13.07.2018 mit vier bzw. acht externen Teilnehmerinnen und Teilnehmern statt. Ein weiteres Projekttreffen wurde im Rahmen des letzten Arbeitspaketes 15.11.2019 durchgeführt, um die Ergebnisse des Projektes vorzustellen. Hierbei waren sechs Teilnehmer anwesend. Alle Treffen wurden in den Räumlichkeiten der Forschungseinrichtung (Technische Universität Darmstadt) veranstaltet.

A2: Im Rahmen von Fallstudien wurden im Jahr verschiedene Logistikdienstleister und Lagerhausbetreiber besucht. Insbesondere das entwickelte Simulationsmodell konnten durch die Besuche konzipiert und anschließend validiert werden. Zudem konnten wichtige Kenngrößen der manuellen Kommissionierung im Rahmen einer Versuchsreihe gemeinsam mit Mitarbeitern eines Praxispartners ermittelt werden, die für das Simulationsmodell als Eingangsparameter genutzt werden können. Eine größtmögliche Relevanz der Simulationsergebnisse bzw. der darauf basierenden Projektergebnisse kann so sichergestellt werden.

A3: Um die Ergebnisse aus den Diskussionen während der PA-Treffen, Besprechungen und Beobachtungen vor Ort zu speziellen Aspekten mit weiterem Expertenwissen und verschiedenen Perspektiven abgleichen und erweitern zu können, wurden mehrere ergänzende Interviews durchgeführt.

B: Veranstaltungen mit der Praxis

B1: Am 05.04.2017 sowie am 03.11.2018 wurde das Projekt im Rahmen des DB Schenker Lab an der TU Darmstadt Praxisvertretern der Schenker Deutschland AG vorgestellt. Anschließend wurde das Konzept sowie das Simulationsmodell mit den Praxisvertretern diskutiert.

B2: Im Rahmen der regelmäßig stattfindenden Zukunftswerkstatt Innovationsallianz zwischen der DB und der TU Darmstadt am 25.10.2017 wurde das Projekt umfangreich präsentiert und gemeinsam mit den Praxispartnern diskutiert.

B3: PA-Treffen am 30.11.2017, 28.02.2018, 13.07.2018 und 15.11.2019 an der TU Darmstadt (siehe Punkt A1)

B4: Am 19.10.2019 wurde das Forschungsprojekt im Rahmen der s.g. Science Pitches auf dem 35. Deutschen Logistik Kongress der Bundesvereinigung Logistik in Berlin vorgestellt.

Knigge, J. (2018): Urban Logistics Facilities – Kurzvorstellung des Forschungsprojektes.
Anlass: Science Pitch im Rahmen des 35. Deutschen Logistik Kongresses (DLK) der Bundesvereinigung Logistik (BVL). Berlin, 19.10.2018.

B5: Am 13.09.2018 wurde das Projekt sowie Ergebnisse aus dem Teilbereich der urbanen Distribution im Verkehrsausschuss des Bundesverbands Großhandel, Außenhandel,

Dienstleistungen e.V. in Berlin vorgestellt und mit den Vertretern verschiedener Handelsverbände diskutiert.

Friedrich, C. (2018): Urban Logistics Facilities – Kooperativ genutzte Logistikeinrichtungen als Zukunftskonzepte für die Versorgung urbaner Zentren. Anlass: BGA-Verkehrsausschuss, Berlin, 13.09.2018.

C: Publikationen in praxisnahen Fachjournals

Folgende Veröffentlichungen sind mit Schwerpunkt auf das vorliegende Forschungsthema während der Projektlaufzeit durch die Forschungsstelle erfolgt:

C1: Elbert, R.; Knigge, J.; Tränkner, J. (2017): Simulation-based analysis of the effects of differences in demand on user behavior in multi-user warehouses. In: 3rd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (ICPLT), 25.09.2017, Darmstadt.

C2: Elbert, R.; Friedrich, C.; Knigge, J. (2017): Urban Logistics Facilities – kooperativ genutzte Logistikeinrichtungen als Zukunftskonzepte für die Versorgung urbaner Zentren. In: Online-Dossier der Bundesvereinigung Logistik e.V., online verfügbar unter: <https://www.bvl.de/dossiers/urbane-logistik>

C3: Elbert, R.; Friedrich, C.; Knigge, J. (2018): Konsolidierung im Labor – Ein Team an der TU Darmstadt erforscht, wie sich städtische Gütertransporte nachhaltig bündeln lassen. In: Deutsche Verkehrszeitung (DVZ), Themenheft Hessen, 72 (22), S. 3

C4: Elbert, R.; Knigge, J.; Friedrich, C. (2018): Horizontale Kooperationen als Lösung für die urbane Logistik? In: LogReal.Direkt (3), S. 24-25.

C5: Elbert, R.; Friedrich, C.: Urban Consolidation Centres. In: Wirtschaftswissenschaftliches Studium (WiSt), 47 (12) pp. 57-59.

C6: Elbert, R., Friedrich, C. (2018): Simulation-based evaluation of urban consolidation centers considering urban access regulations. In: Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, S. 2827-2838.

Elbert, R.; Knigge, J. (2018): How order placement influences resource allocation and order processing times inside a multi-user warehouse. In: Proceedings of the 2018 Winter Simulation Conference, S. 2921-2932.

C7: Elbert, R.; Knigge, J. (2019): Developing a pricing model for promoting coordinated resource demand in cooperative warehouses. In: Urban Freight Transportation Systems, Amsterdam, Elsevier, S. 19-40.

C8: Elbert, R.; Friedrich, C. (2019): Urban consolidation and cargo bikes: a simulation study. Mumbai, In: World Conference on Transport Research, Mumbai, 26.-31. Mai 2019.

D: Konferenzbesuch

Die bis dato erzielten Forschungsergebnisse wurden bereits auf mehreren wissenschaftlichen Konferenzen mit internationalen Wissenschaftlern aus den Bereichen Logistik, Transport und Supply Chain Management und Produktion vorgestellt:

D1: Elbert, R.; Knigge, J. (2017): Simulation-based analysis of the effects of differences in demand on user behavior in multi-user warehouses. Anlass: 3rd Interdisciplinary Conference on Production, Logistics and Traffic (ICPLT). Darmstadt, 25.09.2017.

D2: Elbert, R.; Friedrich, A. (2017): Postervorstellung des Projektes „Urban Logistics Facilities“. Anlass: 34. Deutscher Logistik-Kongress. Berlin, 27.10.2017.

D3: Knigge, J. (2018): Urban Logistics Facilities – Kurzvorstellung des Forschungsprojektes. Anlass: Science Pitch im Rahmen des 35. Deutschen Logistik Kongresses (DLK) der Bundesvereinigung Logistik (BVL). Berlin, 19.10.2018.

D4: Elbert, R.; Friedrich, C. (2018): Simulation-based evaluation of urban consolidation centers considering urban access regulations. Anlass: 2018 Winter Simulation Conference. Göteborg, Schweden. 10.12.2018.

Elbert, R.; Knigge, J. (2018): How order placement influences resource allocation and order processing times inside a multi-user warehouse. Anlass: 2018 Winter Simulation Conference. Göteborg, Schweden. 11.12.2018.

D5: Elbert, R.; Friedrich, C. (2019): Urban consolidation and cargo bikes: a simulation study. Anlass: 15th World Conference on Transport Research (WCTR), Mumbai, Indien, 28.05.2019.

6.2 Transfermaßnahmen nach Abschluss des Vorhabens

Nach Abschluss des Projektes sind weitere Transfermaßnahmen geplant. Diese sind in Tabelle 14 zusammengefasst. Unter der Tabelle werden die Transfermaßnahmen im Detail beschrieben.

Tabelle 14: Durchgeführte und geplante Maßnahmen zum Ergebnistransfer nach Abschluss des Vorhabens.

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Zeitraum
E: Veröffentlichung der Ergebnisse auf Internetportal	Freier Zugang zu Ergebnissen	E1: Internetseite der Forschungsstelle	April / Mai 2020
F: Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften	Bekanntmachung der Ergebnisse und des Leitfadens	F1: Forschungsbericht des Fachgebiets Unternehmensführung und Logistik (Endbericht)	Nach Projektabschluss
G: Transfer durch Verbände	Multiplikatoren-effekt	Zusammenfassender Ergebnisbericht, veröffentlicht bei: G1: Bundesvereinigung Logistik	Innerhalb von sechs Monaten nach Projektabschluss

E: Veröffentlichung der Ergebnisse auf Internetportal

Zentrale Projektergebnisse, insbesondere das Simulationsmodell und der erarbeitete Abschlussbericht, werden nach Projektabschluss auf der Projektwebsite der Forschungsstelle zugänglich gemacht.

F: Publikation der Ergebnisse in Fachzeitschriften

Folgende Veröffentlichungen sind nach Abschluss des Vorhabens bereits erfolgt bzw. geplant:

Für das erste Halbjahr 2020 geplant, die Projektergebnisse in einem Forschungsbericht des Fachgebiets Unternehmensführung und Logistik zu veröffentlichen (**F1**).

G: Transfer durch Verbände

Die Veröffentlichung des Abschlussberichts erfolgt durch die Bundesvereinigung Logistik im ersten Halbjahr des Jahres 2020 (**G1**).

7. Zusammenfassung und abschließende Bewertung

Das Forschungsvorhaben hat sich mit den Themen kooperative Lagerhaltung und kooperative Distribution gleich zwei für die urbane Logistik hochgradig relevanten Forschungsfeldern gewidmet. Durch den systematischen Einsatzes agenten-basierter Simulationsmodelle konnte die Auswirkungen unterschiedlicher Verhaltensweisen innerhalb horizontaler Kooperationen in der Logistik untersucht werden. Zudem konnte ein Preismodell für die kooperative manuelle Kommissionierung entwickelt werden, welches einen Preis pro Pick in Echtzeit berechnen kann und dabei ein koordiniertes Nachfrageverhalten der Kooperationspartner fördert. Darüber hinaus ist das Preismodell auch ohne die Verfügbarkeit unsicherheitsbehafteter oder wettbewerbsrelevanter Daten in der Lage, einen Preis zu berechnen. Das Preismodell kann folglich problemlos auch von KMU im operativen Betrieb eines kooperativen Lagers eingesetzt werden. Indem das entwickelte Simulationsmodell nach Projektabschluss offen zugänglich zur Verfügung gestellt wird, wird es interessierten Unternehmen zudem ermöglicht, den Einsatz des Simulationsmodells risikofrei im Rahmen der Simulation zu erproben.

Durch die Veröffentlichung der Ergebnisse sowohl in praxisnahen Fachzeitschriften als auch in Vorträgen und Online-Medien kann ein umfangreicher Transfer der Ergebnisse in die Wirtschaft sichergestellt werden. Die während des Projektes regelmäßig durchgeführten Workshops, Experteninterviews und Diskussionsrunden mit Vertretern aus der Praxis stellten sicher, dass die Projektbearbeitung stets praxisnah und anforderungsgerecht erfolgte. Durch die zusätzlich erfolgten Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Journals und auf wissenschaftlichen Konferenzen wurde zudem sichergestellt, dass die eingesetzten Methoden wissenschaftlich fundiert und auf dem aktuellen Stand der Forschung sind. Zudem wird so eine Nutzung der Projektergebnisse über die Projektlaufzeit hinaus für Folgeprojekte oder anknüpfende Forschungsarbeiten ermöglicht. Die Ziele des Forschungsvorhabens wurden nach Einschätzung der Forscher und der beteiligten Praxispartner somit uneingeschränkt erreicht.

Literaturverzeichnis

- Allen, J., Browne M., Woodburn A., & Leonardi J. (2012).** The Role of Urban Consolidation Centres in Sustainable Freight Transport. *Transport Reviews* 32 (4), 473–490.
- Amigo, I., Belzarena, P., & Vaton, S. (2016).** Revenue sharing in network utility maximization problems. *NETNOMICS: Economic Research and Electronic Networking*, 255–284. <https://doi.org/10.1007/s11066-016-9112-4>
- Borshchev, A. (2013).** *The Big Book of Simulation Modelling*. AnyLogic North America.
- Browne, M., Allen, J., Nemoto, T., Patier, D., & Visser, J. (2012).** Reducing Social and Environmental Impacts of Urban Freight Transport: A Review of Some Major Cities. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 19–33.
- Browne, M., Woodburn, A., & Allen, J. (2007).** Evaluating the potential for urban consolidation centres. *European Transport - Trasporti Europei*, 35, 46–63.
- Crainic, T. G., Ricciardi, N., & Storchi, G. (2009).** Models for Evaluating and Planning City Logistics Systems. *Transportation Science*, 43(March), 432–454.
- Crujssen, F., Bräysy, O., Dullaert, W., Fleuren, H., & Salomon, M. (2007).** Joint route planning under varying market conditions. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 37(4), 287–304.
- D'amours, S., & Rönnqvist, M. (2010).** Issues in Collaborative Logistics. In E. Bjørndal, M. Bjørndal, P. M. Pardalos, & M. Rönnqvist (Eds.), *Energy, Natural Resources and Environmental Economics* (pp. 395–409). Heidelberg: Springer.
- Danielis, R., Rotaris, L., & Marcucci, E. (2010).** Urban freight policies and distribution channels. *European Transport - Trasporti Europei*, 46(46), 114–146.
- Deckert, A., & Klein, R. (2010).** Agentenbasierte Simulation zur Analyse und Lösung betriebswirtschaftlicher Entscheidungsprobleme. *Journal Fur Betriebswirtschaft*, 60(2), 89–125.
- Elbert, R., & Müller, J. P. (2017).** The Impact of item weight on travel times in picker-to-parts order picking: An agent-based simulation approach. In W. K. V. Chan, A. D'Ambrogio, G. Zacharewicz, N. Mustafee, G. Wainer, & E. Page (Eds.), *Proceedings of the 2017 Winter Simulation Conference* (pp. 3162–3173). Piscataway, New Jersey: IEEE.
- Elbert, R., Tränkner, J., & Özsucu, Ö. (2012).** Achieving Supply Chain Robustness by Horizontal Cooperation. In W. Delfmann & T. Wimmer (Eds.), *Coordinated Autonomous Systems* (pp. 28–42). Hamburg: DVV Media Group.
- EuroTransportMedia Verlags- und Veranstaltungs-GmbH (ETM) (2015).** lastauto omnibus Katalog 2015. Stuttgart.
- Franklin, R., & Spinler, S. (2011).** Shared Warehouses - Sharing Risks and Increasing Eco-efficiency. *International Commerce Review*, 10(1), 22–31.

- Franzke, T., Grosse, E. H., Glock, C. H., & Elbert, R. (2017).** An investigation of the effects of storage assignment and picker routing on the occurrence of picker blocking in manual picker-to-parts warehouses. *The International Journal of Logistics Management*, 28(3), 841–863. <https://doi.org/10.1108/IJLM-04-2016-0095>
- Frisk, M., Göthe-Lundgren, M., Jörnsten, K., & Rönnqvist, M. (2010).** Cost allocation in collaborative forest transportation. *European Journal of Operational Research*, 205(2), 448–458. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.01.015>
- Grosse, E. H., Glock, C. H., & Ballester-Ripoll, R. (2014).** A Simulated Annealing Approach for the Joint Order Weight Restrictions. *International Journal of Operations and Quantitative Management*, 20(2), 65–83.
- Hariga, M. A. (2011).** Inventory models for multi-warehouse systems under fixed and flexible space leasing contracts. *Computers and Industrial Engineering*, 61(3), 744–751. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2011.05.006>
- Hong, S., & Kim, Y. (2017).** A route-selecting order batching model with the S-shape routes in a parallel-aisle order picking system. *European Journal of Operational Research*, 257(1), 185–196. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.07.017>
- Janjevic, M., & Ndiaye, A. (2017).** Investigating the financial viability of urban consolidation centre projects. *Research in Transportation Business and Management*, 24(February), 101–113.
- KE-CONSULT Kurte & Esser GbR, (2018).** BIEK-Kompendium „Zahlen, Daten, Fakten zum Kurier-, Express-, Paketmarkt“ Teil 1: Transportaufkommen und Durchschnittliches Gewicht.
- Krajewska, M. A., Kopfer, H., Laporte, G., Ropke, S., & Zaccour, G. (2008).** Horizontal cooperation among freight carriers: request allocation and profit sharing. *Journal of the Operational Research Society*, 59(11), 1483–1491.
- Lahyani, R. Khemakhem, M. & Semet, F. (2015).** Rich vehicle routing problems: From a taxonomy to a definition. *European Journal of Operational Research*, 241(1), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.07.048>
- Lindholm, M. (2012).** How Local Authority Decision Makers Address Freight Transport in the Urban Area. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 134–145.
- Liu, P., Wu, Y., & Xu, N. (2010).** Allocating Collaborative Profit in Less-than-Truckload Carrier Alliance. *Journal of Service Science and Management*, 3, 143–149. <https://doi.org/10.4236/jssm.2010.31018>
- Lozano, S., Moreno, P., Adenso-Díaz, B., & Algaba, E. (2013).** Cooperative game theory approach to allocating benefits of horizontal cooperation. *European Journal of Operational Research*, 229(2), 444–452. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.02.034>
- Makaci, M., Reaidy, P., Evrard-Samuel, K., Botta-Genoulaz, V., & Monteiro, T. (2017).** Pooled warehouse management: An empirical study. *Computers and Industrial Engineering*, 112, 526–536. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2017.03.005>

- Manuj, I., Mentzer, J. T., & Bowers, M. R. (2009).** Improving the rigor of discrete-event simulation in logistics and supply chain research. *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, 39(3), 172-201.
<https://doi.org/10.1108/09600030910951692>
- Marcucci, E., & Danielis, R. (2008).** The potential demand for a urban freight consolidation centre. *Transportation*, 35(2), 269–284.
- Moutaoukil, A., Derrouiche, R., Neubert, G., Fayol, I., & Fauriel, C. (2012).** Pooling Supply Chain: Literature Review of Collaborative Strategies. In L. M. Camarinha-Matos, L. Xu, & H. Afsarmanesh (Eds.), *Collaborative Networks in the Internet of Services* (pp. 513–525). Berlin Heidelberg: Springer.
- Özener, O. Ö., & Ergun, Ö. (2008).** Allocating Costs in a Collaborative Transportation Procurement Network. *Transportation Science*, 42(2), 146–165.
<https://doi.org/10.1287/trsc.1070.0219>
- Pan, S., Ballot, E., & Fontane, F. (2013).** The reduction of greenhouse gas emissions from freight transport by pooling supply chains. *International Journal of Production Economics*, 143(1), 86–94.
- Petersen, C. G., & Aase, G. (2004).** A comparison of picking, storage, and routing policies in manual order picking. *International Journal of Production Economics*, 92(1), 11–19.
- Pisinger, D., & Ropke S., (2007).** A General Heuristic for Vehicle Routing Problems. *Computers & Operations Research* 34(8), 2403–2435.
- Rudolph, C., & Gruber, J., (2017).** Cargo cycles in commercial transport. *Research in Transportation Business & Management* 24, 26-36.
- Schäfer, P., Schocke, K.-O., Höhl, S., Quitta, A., Kämmer, A., Blume, S., & Brandt, J., (2017).** Wirtschaftsverkehr 2.0 - Analyse und Empfehlungen für Belieferungsstrategien der KEP-Branche im innerstädtischen Bereich. Frankfurt University of Applied Sciences. 2017.
- Schrimpf, G., Schneider, J., Stamm-Wilbrandt, H., & Dueck, G. (2000).** Record Breaking Optimization Results Using the Ruin and Recreate Principle. *Journal of Computational Physics* 159(2), 139–171.
- Schröder, S. (2017).** jsprit: 1.7.2. <https://github.com/graphhopper/jsprit>.
- Shapley, L. S. (1953).** A Value for n-Person Games. *Annals of Mathematics Studies*, 28, 307–317.
- Sherali, H. D., & Lunday, B. J. (2011).** Equitable apportionment of railcars within a pooling agreement for shipping automobiles. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 47(2), 263–283. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2010.09.005>
- Van Duin, J. H. R., Quak, H., & Muñuzuri, J. (2010).** New challenges for urban consolidation centres: A case study in The Hague. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2(3), 6177–6188.

Van Duin, J. H. R., van Kolck, A., Anand, N., Tavasszy, L. A., & Taniguchi, E. (2012).

Towards an Agent-Based Modelling Approach for the Evaluation of Dynamic Usage of Urban Distribution Centres. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 39, 333-348.

Van Heeswijk, W., Larsen, R., & Larsen, A., (2019). An Urban Consolidation Center in the City of Copenhagen: a Simulation Study. *International Journal of Sustainable Transportation*, 13(9), 675-691.

Van Heeswijk, W., Mes, M. & Schutten, M. (2016). An Agent-Based Simulation Framework to Evaluate Urban Logistics Schemes. *Computational Logistics*, edited by A. P. et al., 369–383. Cham: Springer International Publishing.

Vanovermeire, C., & Sörensen, K. (2014). Measuring and rewarding flexibility in collaborative distribution, including two-partner coalitions. *European Journal of Operational Research*, 239(1), 157–165.

Won, J., & Olafsson, S. (2005). Joint order batching and order picking in warehouse operations. *International Journal of Production Research*, 43(7), 1427–1442.
<https://doi.org/10.1080/00207540410001733896>

Yang, T., & Zhou, J. (2014). Economical Analysis of Cooperative Behavior of Transportation and Warehousing Company Based on Resource Integration. *Advanced Materials Research*, 1073–1076, 2398–2401. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1073-1076.2398>